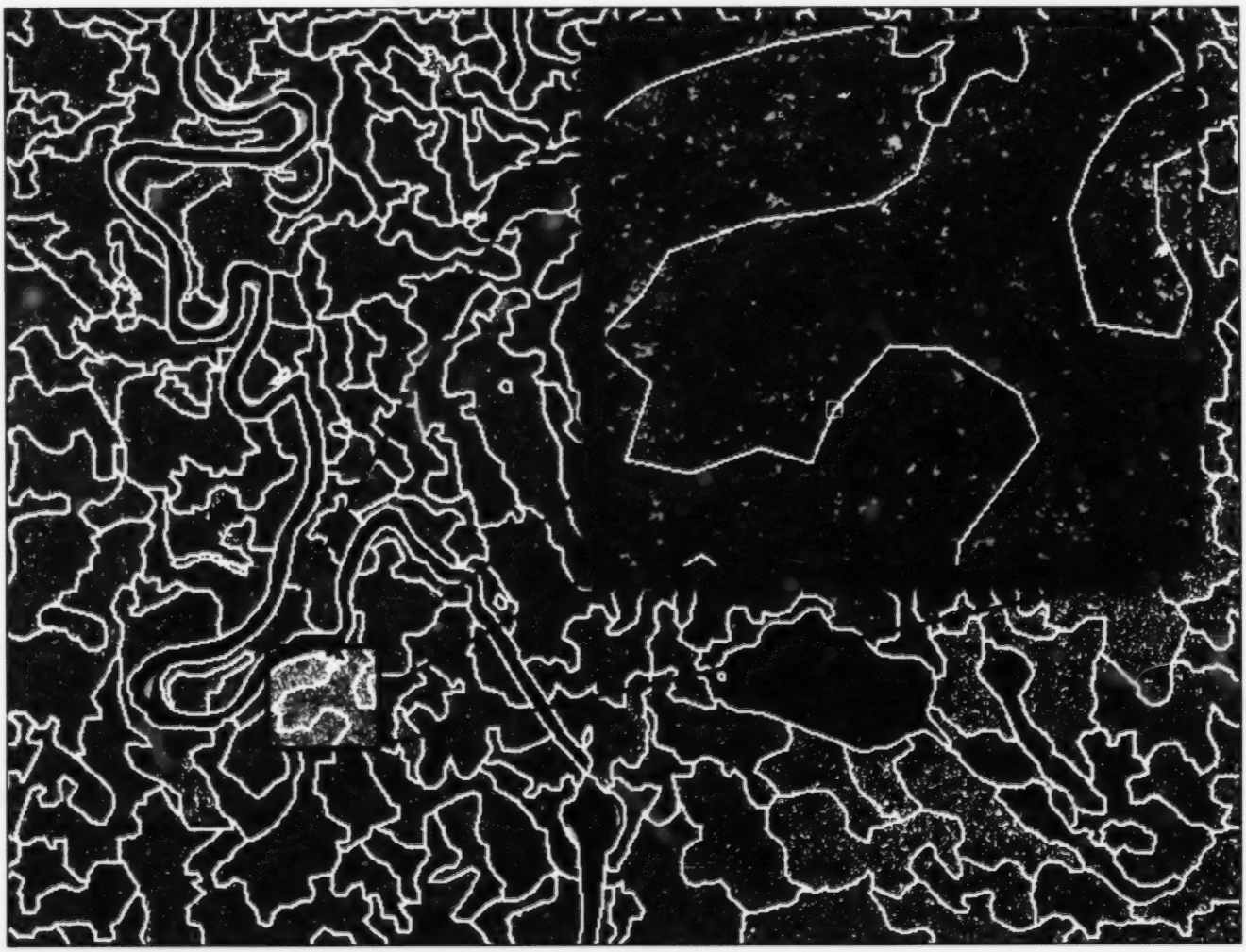
Extraction d'information forestière à partir d'images à haute résolution spatiale en utilisant une méthode de reconnaissance individuelle des cimes d'arbres

François A. Gougeon et Donald G. Leckie

Centre de foresterie du Pacifique • Victoria, Colombie-Britannique

Rapport d'information • BC-X-396F



Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts

Natural Resources Canada
Canadian Forest Service

Canada

Le Centre de foresterie du Pacifique à Victoria (Colombie-Britannique)

Le Centre de foresterie du Pacifique du Service canadien des forêts effectue des recherches dans le cadre d'un réseau national cherchant à répondre aux besoins des divers responsables de la gestion des ressources forestières. Les résultats de ces recherches sont diffusés dans des rapports scientifiques et techniques et d'autres publications.

De plus amples renseignements sur les travaux et ies publications de Ressources naturelles Canada, du Service canadien des forêts et du Centre de foresterie du Pacifique sont présentés sur le Web, à l'adresse www.cfp.scf.rncan.gc.ca/.

103-05280/

Extraction d'information forestière à partir d'images à haute résolution spatiale en utilisant une méthode de reconnaissance individuelle des cimes d'arbres

François A. Gougeon et Donald G. Leckie

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Pacifique
Rapport d'information BC-X-396F

2003

Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Pacifique
506 West Burnside Road
Victoria (Colombie-Britannique) V8Z 1M5
Téléphone : (250) 363-0600
http://www.pfc.cfs.nrcan.gc.ca

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2003

ISSN 0830-0453
ISBN 0-662-33272-5

Imprimé au Canada

On peut se procurer cette publication sur microfiches auprès de :

MicroMedia Inc.
240, rue Catherine, bureau 305
Ottawa (Ontario) K2P 2G8

This publication is also available in English

Données de catalogage avant publication de la Bibliothèque nationale du Canada

Gougeon, François A.

Extraction d'information forestière à partir d'images à haute résolution spatiale en utilisant une méthode de reconnaissance individuelle des cimes d'arbres

(Rapport d'information ; BC-X-396)
Publ. aussi en anglais sous le titre : Forest information extraction from high spatial resolution images using an individual tree crown approach.
Comprend un résumé en anglais.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-662-88831-6
No de cat. Fo46-17/396F

1. Photographie aérienne en foresterie.
2. Inventaires forestiers – Méthodologie.
3. Traitement d'images – Techniques numériques.
I. Leckie, Donald Gordon, 1953-
II. Centre de foresterie du Pacifique.
III. Titre.
IV. Coll. : Rapport d'information (Centre de foresterie du Pacifique) ; BC-X-396.

SD387.A25G68 2003 333.75'11 C2003-980192-6

Table des matières

Résumé/Abstract iv
Introduction 1
Techniques et méthodes 2
- Prétraitement d'images et génération de masques 4
- Délinéation individuelle des cimes 6
- Classification individuelle des cimes 10
- Évaluations de l'exactitude 11
- Regroupement des cimes et création de peuplements 12
- Détection du faîte des arbres 14

Applications aux inventaires forestiers 16
Conclusion 22
Bibliographie 23

Image de la couverture – Résultats de la classification par espèce et du regroupement de cimes et de groupes d'arbres superposés sur l'image panchromatique IKONOS d'origine (1 m/pixel) d'une partie d'une étendue de 10 000 ha (11,7 × 8,6 km^2) dans la région du lac à l'Ours, au Québec, analysée au moyen de l'approche « à l'arbre près ». Ces travaux ont été menés en collaboration avec CLC-Camint (Gatineau) et Industries Davidson Inc., et en partie financés dans le cadre du Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier - Volet 1 du ministère des Ressources naturelles du Québec. À l'intérieur des étendues boisées, les espèces sont représentées par les couleurs suivantes :

	Pin blanc
	Sapin-épinette
	Cèdre
	Érable
	Peuplier
	Bouleau à papier
	Bouleau jaune
	Autres feuillus
	Régénération
	Étendue dénudée

Résumé

La plupart des intervenants forestiers seraient d'accord pour dire qu'il y a un besoin pressant pour améliorer la précision, l'exactitude, l'opportunité, l'envergure et le coût de revient de l'information forestière. Ces buts pourraient être très difficiles à réaliser sans un changement majeur de paradigme tel que celui présenté dans ce rapport : l'analyse numérique d'images multispectrales aérospatiales à haute résolution spatiale (10-100 cm/pixel) pour produire des inventaires forestiers « à l'arbre près ». Ce rapport décrit quelques unes des techniques, des méthodes et des outils se rapportant à l'extraction d'information « à l'arbre près » développés par le Service canadien des forêts au cours des derniers quinze ans et résume certains résultats reliés à la production d'inventaires forestiers très détaillés. D'autres applications forestières de l'approche « à l'arbre près » sont aussi mentionnée brièvement. La disponibilité récente de satellites à haute résolution spatiale (cm/pixel) produisant des images de bonne qualité et d'une grandeur commensurable avec les cartes forestières devrait rendre possible une production très efficiente d'inventaire « à l'arbre près ».

Abstract

Most foresters would agree that there is a pressing need to improve the precision, accuracy, timeliness, completeness and cost-effectiveness of forest information. These goals may be difficult to reach without a major shift in paradigm such as the one presented in this report: the computer analysis of high spatial resolution (10-100 cm/pixel) multispectral aerial or satellite images to produce individual-tree-crown–based (ITC -based) forest inventories. This report describes some of the techniques, methods and tools for ITC-based information extraction that have been developed by the Canadian Forest Service over the last fifteen years, and it summarizes some of the results related to the production of highly detailed forest inventories. Other forestry applications of an ITC-based approach are also briefly mentioned. The recent availability of high spatial resolution (cm/pixel) satellites delivering good quality images of map sheet size should make the production of ITC-based inventories very efficient.

Introduction

La mondialisation de l'économie, les préoccupations environnementales internationales et locales ainsi que la relative rareté des forêts anciennes conduisent à une législation forestière plus stricte, à des pressions quant à la certification et à une tendance générale à se tourner vers des pratiques forestières plus sophistiquées (foresterie de précision). Que ce soit dû aux exigences de compte-rendus internationaux, nationaux ou provinciaux, aux certifications locales ou à l'utilisation opérationnelle, un besoin se fait sentir d'améliorer la précision, l'exactitude, l'actualité, l'envergure et le coût de revient de l'information sur les forêts. Ces améliorations pourraient être apportées petit à petit, en changeant progressivement les méthodes existantes (p. ex., des parcelles plus détaillés, davantage de vérifications sur le terrain ou d'autres méthodes d'échantillonnage), mais elles ne se feront pas sans de sérieuses considérations de coûts. Des contraintes budgétaires pourraient nous obliger à opter pour des mesures plus novatrices et, même, éventuellement, pour un changement majeur de paradigme : le passage de la cartographie de peuplements forestiers relativement homogènes et de l'interprétation de leur contenu à partir de photographies aériennes à moyenne échelle à l'analyse informatique semi-automatique « à l'arbre près » d'images multispectrales aériennes ou satellitaires à haute résolution (10-100 cm/pixel). La disponibilité croissante de telles images de télédétection ou même de photographies aériennes numérisées qu'il est possible de visualiser à l'écran, de même que le développement en cours d'outils d'analyse d'images basés sur ce nouveau modèle font de l'analyse « à l'arbre près » des régions forestières une option intéressante. Bien que représentant un changement majeur de paradigme, une telle transition pourrait être assez graduelle. En effet, bien que l'analyse se fasse surtout par ordinateur et « à l'arbre près », il est toujours possible de faire un compte rendu de l'information à l'échelle du peuplement forestier.

Au cours des quinze dernières années, des techniques, des méthodes et des procédés ont été mis au point pour séparer les étendues boisées des étendues non boisées, pour délinéer des cimes individuelles, pour en identifier les espèces et, si nécessaire, les regrouper par peuplements forestiers ou strates environnementales générés automatiquement. À partir de cette information détaillée, de nombreux paramètres novateurs, en plus de ceux des inventaires classiques, peuvent être facilement extraits (p. ex., l'emplacement des chicots, les trouées forestières, l'état sanitaire, et la localisation d'arbres de très grande valeur). Avec le temps et l'amélioration de la puissance des ordinateurs, les aménagistes des forêts pourront peut-être renoncer aux regroupements statiques et conserver toute l'information concernant chaque cime (p. ex., l'emplacement, le diamètre de la cime, la hauteur, l'espèce et la dominance). Si nécessaire, un regroupement peut alors être effectué sur demande, pour chaque application spécifique. Ceci peut aussi mener à des estimations plus précises de volume et de biomasse, et favoriser l'utilisation de modèles de croissance basés sur les cimes individuelles.

Ce rapport décrit quelques-unes des techniques, des méthodes et des outils mis au point par le Service canadien des forêts en vue de la réalisation de ce nouveau paradigme d'inventaire forestier à l'arbre près. Les exigences de prétraitement des images y sont exposées de meme que certaines heuristiques reliées aux applications. D'importants paramètres pour la délinéation individuelle des cimes à partir d'images à haute résolution spatiale par une technique de *suivi des vallées* se concentrant sur les espaces ombragés situés entre les cimes sont discutés. La création de signatures d'espèces ou d'espèces en situations spécifiques et le procédé de classification dirigée attribuant une espèce à chaque cime sont abordés. Des méthodes de regroupement des cimes en peuplements forestiers et des méthodes d'évaluation de l'exactitude sont aussi examinées. La méthode de *détection du faîte des arbres*, une approche « à l'arbre près » plus adaptée aux évaluations de la régénération, est étudiée, de même qu'une de ses variantes, utile dans des plantations plus clairsemées. Finalement, des résultats importants concernant l'utilisation de ces outils aux étapes essentielles d'une production semi-automatique d'inventaires forestiers détaillés sont résumés. Les limites actuelles de même que les orientations des recherches en cours sont aussi exposées. Les lecteurs intéressés seulement par les résultats concernant les applications forestières pourraient choisir de sauter le chapitre intitulé « Techniques et méthodes ».

Techniques et méthodes

Les approches « à l'arbre près », qui représentent un domaine de recherche relativement nouveau, peuvent être réparties en trois courants principaux en fonction de l'information obtenue : emplacement de l'arbre, emplacement de l'arbre et paramétrage des dimensions de la cime, et entière délinéation de la cime. De plus, les techniques elles-mêmes peuvent être, séparées en deux groupes – celles basées sur la modélisation de l'aspect d'une cime sur une image et celles basées sur des algorithmes de traitement d'image plus classiques.

La localisation d'arbres peut être réalisée par simple détection des maximums locaux d'une image dans des étendues boisées denses (Gougeon et Moore, 1989; Eldridge et Edwards, 1993; Dralle et Rudemo, 1996). À condition que les paramètres de dimensions du filtre et de lissage de l'image soient adaptés aux dimensions des arbres et à la résolution de l'image, cette méthode fonctionne bien pour les peuplements de conifères, où les maximums locaux correspondent souvent de près aux faîtes des arbres. Des procédés qui s'adaptent localement ont aussi été mis au point (Gougeon et Leckie, 1999; Wulder et coll., 2000). De telles approches débouchent sur des estimations du nombre de tiges et même sur des classifications d'espèces relativement satisfaisantes faites à partir de classificateurs conventionnels (par pixel) à maximum de vraisemblance (Gougeon et Moore, 1989).

Les techniques qui localisent les arbres et déterminent la dimension de leur cime sont basées soit sur la détection des maximums locaux puis l'établissement de la limite de la cime (Pinz, 1991; Uuttera et coll., 1998; Pouliot et coll., 2002), soit sur l'association de caractéristiques d'image avec des instanciations à deux dimensions de modèles de cimes – type de cime et diamètre particuliers (Pollock, 1994; Larsen et Rudemo, 1998). De telles approches peuvent déboucher sur des dénombrements de tiges, des classifications d'espèces et des estimations du diamètre des cimes. Si l'emplacement des arbres et leur taille approximative peuvent être déterminés, d'autres techniques de classification des espèces, telles que celles basées sur les réseaux neuronaux, ont été essayées (Pinz et coll., 1993).

Les techniques basées sur la délinéation complète des cimes sont des algorithmes de traitement d'image suivant soit des vallées d'ombre entre les cimes sur une image d'intensité (Gougeon, 1995b; Andrew et coll., 1999; Culvenor, 2000), soit les contours créés par un opérateur gradient et analysant leur courbure (Brandtberg, 1999). De telles approches peuvent déboucher des dénombrements de tiges, des classifications d'espèces basées sur l'analyse des cimes, des estimations du diamètre des cimes et de la fermeture du couvert, des analyses de trouées, des estimations de biomasse (Bhogal et coll., 2000) et peut-être des estimations de volume (Magnussen et coll., 1999; St-Onge, 2001). Elles pourraient déboucher sur des inventaires forestiers « à l'arbre près » complets et précis dans un proche avenir.

Ce rapport explique plusieurs des techniques et méthodes centrées sur une méthode automatisée de délinéation des arbres – l'approche du suivi des vallées (Gougeon, 1995b) – et décrit brièvement la technique de détection du faîte des arbres (Gougeon et Moore, 1989), une des approches les plus populaires de localisation et de dénombrement d'arbres. Ces techniques sont décrites de façon suffisamment détaillée pour permettre une compréhension approfondie de certains de leurs paramètres importants, de leurs faiblesses, de leurs limites et des applications forestières appropriées. On y aborde aussi les techniques utilisées pour extraire des paramètres spécifiques relatifs aux forêts ou aux peuplements (p. ex., la classification d'espèces, le regroupement de cimes) de même qu'on y décrit quatre façons de réaliser des évaluations d'exactitude. Les besoins en matière de prétraitement et de posttraitement sont aussi pris en compte. Le Progiciel ITC d'analyse « à l'arbre près » est constamment cité en référence et est utilisé pour diriger l'attention du lecteur sur les aspects critiques de ce type d'analyse d'images. Les organigrammes des figures 1 et 2 illustrent certaines des étapes essentielles et les principaux programmes du Progiciel ITC utilisés pour obtenir les compositions en espèces à l'arbre près d'étendues boisées observées sur des images multispectrales à haute résolution spatiale.

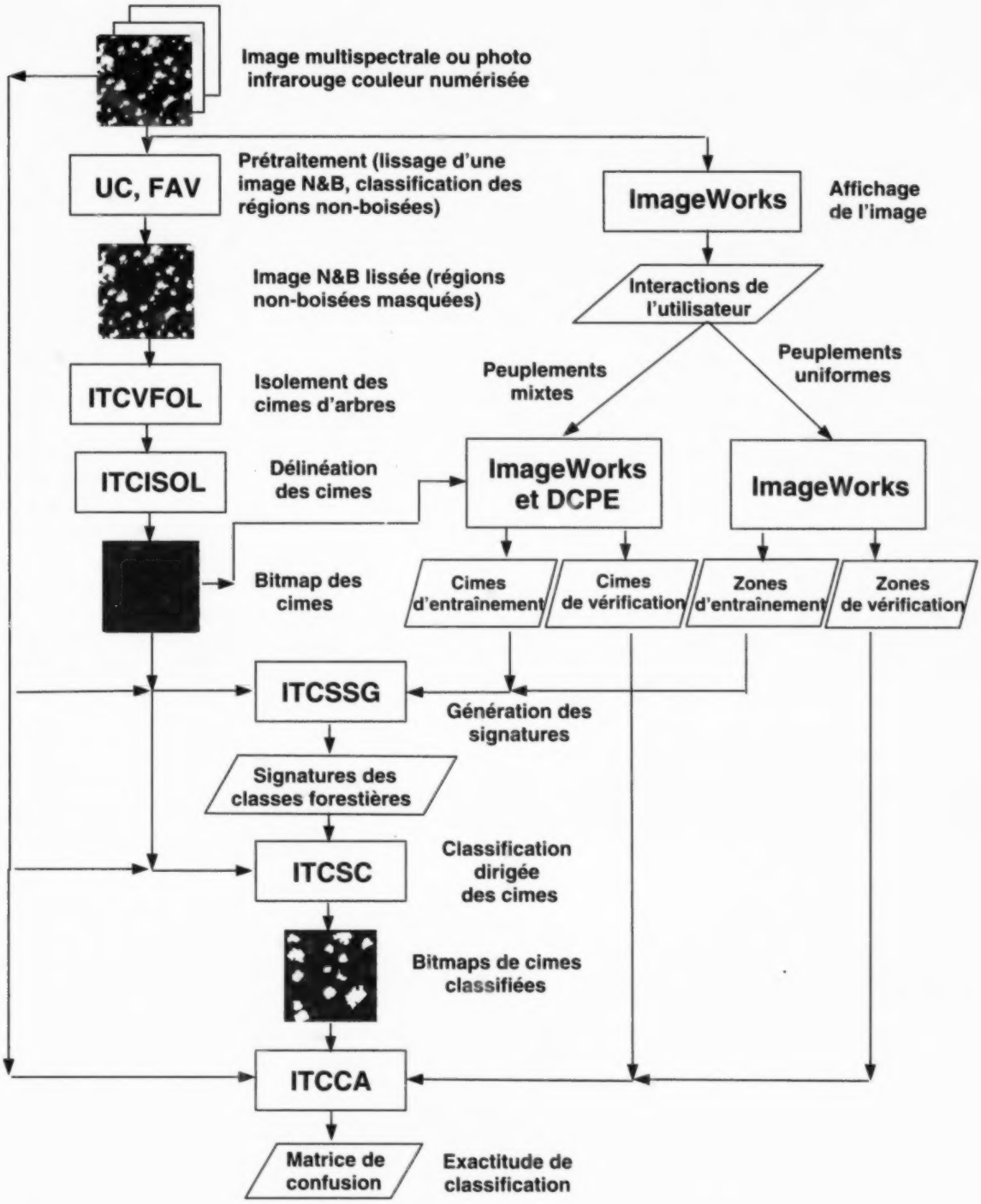


Figure 1 – *Méthodologie de la délinéation individuelle des cimes et de la classification dirigée d'après des images multispectrales à haute résolution spatiale (d'après Gougeon, 1997).*

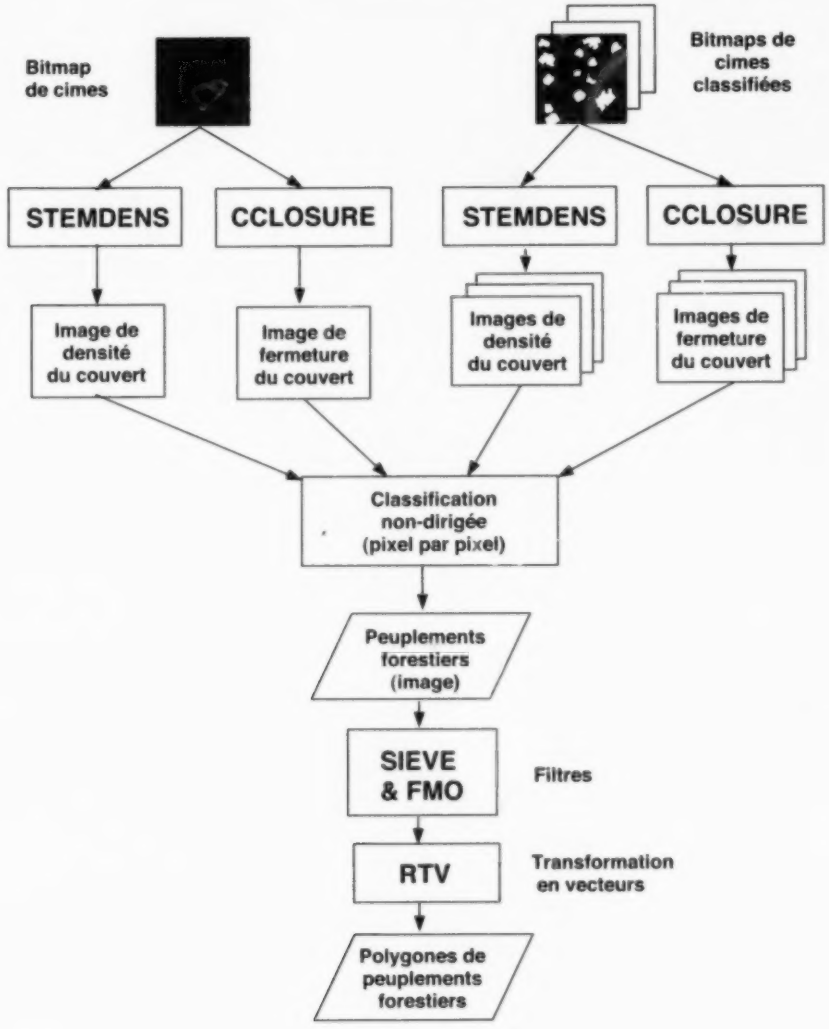


Figure 2 – *Méthodologie de la génération de polygones de peuplements forestiers d'après de l'information provenant de l'analyse des cimes (d'après Gougeon, 1997).*

Prétraitement d'images et génération de masques

Un prétraitement est nécessaire lors de la sélection et à la préparation d'une image d'éclairement appropriée au procédé de délinéation des cimes ainsi que pour créer des masques permettant d'assurer que le procédé de délinéation se concentre sur les régions moyennement à densément boisées auxquelles il convient le mieux.

Lorsqu'on travaille avec une image multispectrale, la sélection d'une bande appropriée comme image d'éclairement dépend souvent des applications forestières visées. Pour réaliser un inventaire forestier général, on préfère habituellement la bande du proche infrarouge, bien que la bande verte puisse fonctionner efficacement. Pour évaluer la défoliation, la bande bleue peut être plus appropriée. Il est aussi possible de générer une image d'éclairement à partir de plusieurs combinaisons de bandes ou à l'aide de procédés tels que l'analyse par composantes principales ou les transformations intensité-tonalité-saturation. Lorsqu'un canal brut est sélectionné, il est généralement lissé pour faciliter la délinéation des cimes. Par contre, cela n'est pas forcément nécessaire quand l'image d'éclairement est le résultat d'un procédé de transformation. Aussi, étant donné qu'actuellement le procédé de délinéation fonctionne mieux avec des résolutions spatiales proches de 30 à 60 cm/pixel, il convient de rééchantillonner à 50 cm/pixel les images à plus grande résolution (disons 10 cm/pixel). Ce rééchantillonnage

produit également des images plus petites, dont le traitement exige moins de ressources informatiques. Dans le cas de résolutions moindres, par exemple une image IKONOS de 1 m/pixel, de meilleurs résultats sont aussi obtenus par un rééchantillonnage à 50 cm/pixel. Même si on ne gagne pas d'information en doublant la résolution, cela donne des limites de cimes plus précises et permet de détecter de plus petits arbres. En effet, le procédé de délinéation ne détecte et ne délimite les cimes qu'à partir de 2 × 2 pixels de superficie.

Des masques devraient également être créés afin d'éliminer certaines régions de l'analyse d'image, sans quoi, les lignes tiretées sur les routes pourraient facilement être interprétées (mal) comme des cimes d'arbres, puisque ces lignes tiretées correspondent à l'hypothèse principale du procédé de délinéation : elles constituent des objets compacts plus brillants que ce qui les entoure (c.-à-d. le revêtement de la route). Avec l'imagerie multispectrale, on peut parfois utiliser l'information multispectrale elle-même pour créer de tels masques. Par exemple, une classification par pixel (UC à la figure 1) ou une analyse d'indice de végétation d'une image à résolution dégradée peuvent souvent servir à éliminer des étendues renfermant des entités anthropiques, des lacs ou d'autres étendues ne présentant aucun intérêt. Cette approche présente l'avantage additionnel de produire des couches thématiques pouvant s'avérer utiles dans le rendu de la classification définitive d'une vaste région ou la production de couvertures multiniveaux lors du transfert de l'information résultante dans un système d'information géographique. Lorsqu'il ne reste que les étendues avec végétation, on peut souvent utiliser des mesures de texture pour séparer les étendues boisées des étendues non boisées. Avec des images géoréférencées, les données d'un système d'information géographique peuvent servir à générer divers masques. Par exemple, les lacs, les lits des cours d'eau et les zones marécageuses peuvent facilement être extraits d'un inventaire forestier existant ou d'une carte de base.

Les étendues boisées dont les arbres sont cependant assez clairsemés présentent davantage de difficultés. Dans ce cas également, les données multispectrales peuvent souvent aider. Cela est particulièrement vrai lorsque l'arrière-plan consiste en débris ligneux (p. ex., une coupe partielle), en lichens, en sable, en affleurements rocheux, en sols ou en matériaux herbacés sénescents (sur des images captées au début du printemps ou en automne). Des règles multispectrales simples, comme celle imposant la détection des pixels présentant une radiance dans le proche infrarouge inférieure à leur radiance moyenne dans le visible, permettent de créer des masques efficaces des étendues ne comportant pas de végétation à l'intérieur de ces régions boisées. Les étendues présentant des arbres mûrs qui sont assez clairsemés pour permettre l'observation d'une végétation en sous-étage (feuillus, résineux ou broussailles) restent problématiques.

D'habitude, le recours à la texture est la seule solution envisageable lors de l'analyse d'imageries panchromatiques. Les étendues non boisées peuvent généralement être éliminées d'après leurs caractéristiques texturales différentes. De même manière, les étendues en voie de régénération peuvent souvent être isolées (figure 3). Cependant, puisque la texture est essentiellement une mesure dépendante de la superficie, cette approche convient mieux au traitement d'étendues assez grandes et, même alors, on peut s'attendre à des problèmes aux limites des masques. Des inhomogénéités mineures à l'intérieur d'une texture donnée peuvent également engendrer des artéfacts auxquels on ne peut remédier facilement sans intervention humaine.

Si des données de hauteurs LiDAR à moyenne (m/pixel) ou à grande (cm/pixel) résolution spatiale sont disponibles, de simples seuils peuvent être utilisés avec un modèle de hauteur du couvert pour séparer les étendues avec végétation au niveau du sol des étendues en voie de régénération (ou recouvertes de broussailles) ainsi que pour isoler ces deux types d'étendues des étendues boisées. Cela facilite en outre l'analyse distincte des étendues en voie de régénération qui, selon l'âge de la régénération et la résolution spatiale de l'imagerie, peut mieux s'effectuer, par l'approche de détection du faîte des arbres ou sa variante adaptive (voir la section appropriée). Avec des données LiDAR à haute résolution spatiale, les étendues de broussailles ou en voie de régénération naturelle peuvent même être masquées à l'intérieur même d'étendues d'arbres mûrs clairsemés. En fait, la délinéation des cimes d'arbres peut être effectuée directement sur le modèle de hauteur du couvert, soit séparément, soit en synergie avec la délinéation d'après l'image (Gougeon et coll., 2001b).

Enfin, si toutes les méthodes échouent, ou simplement pour accélérer le processus, des régions peuvent être rapidement éliminées en les délinéant à la main à l'écran et en les sauvegardant sous forme de masques binaires. Lorsqu'ils sont classés en différentes catégories, ces masques peuvent en outre être très utiles dans le rendu des produits finals.

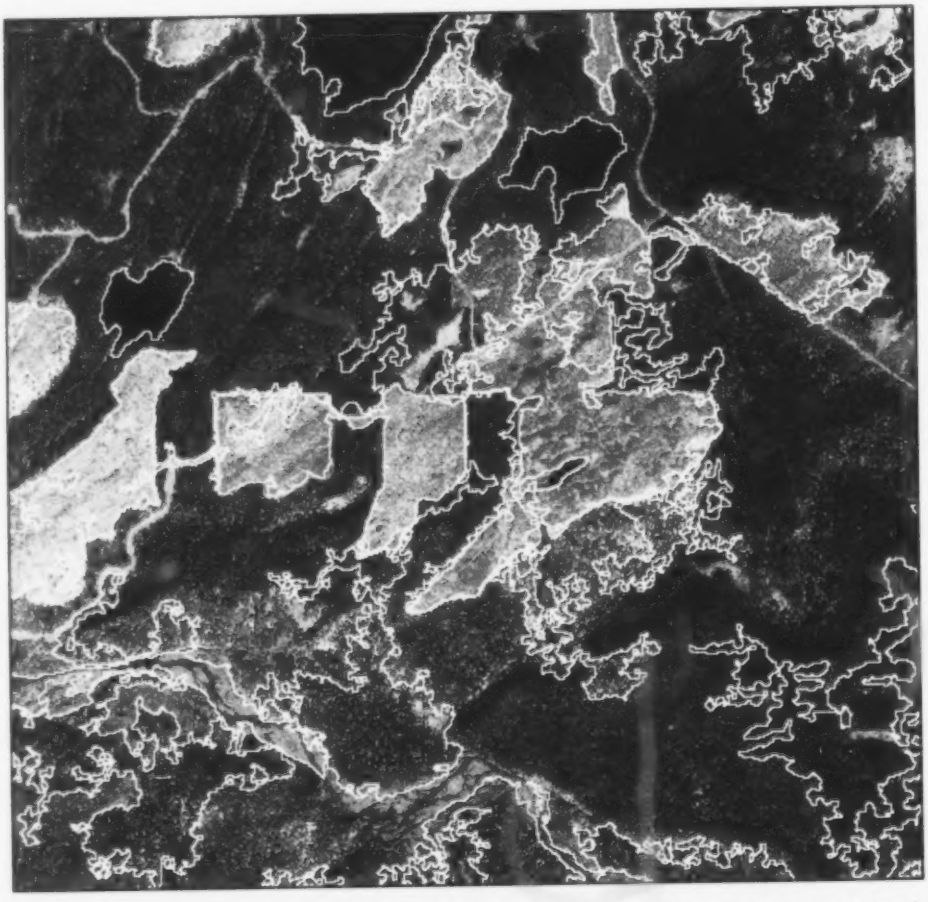


Figure 3 – *Exemple d'utilisation de l'analyse texturale pour séparer de manière quasi automatique des étendues boisées et non boisées, ce qui permet de concentrer le procédé d'analyse « à l'arbre près » exclusivement sur les étendues boisées.*

Délinéation individuelle des cimes

Lorsque les étendues non boisées ont été masquées et qu'une image d'éclairement convenable a été choisie ou générée, la délinéation des cimes est effectuée en deux grandes étapes. Premièrement, d'après l'hypothèse suivant laquelle les cimes des arbres sont perçues distinctement sur les images à haute résolution parce qu'elles constituent des entités brillantes séparées par des zones d'ombre, un procédé de « suivi des vallées » parcourt de multiples chemins entre les arbres, de la même manière qu'on suivrait des vallées entre des montagnes (figure 4). Cela donne une assez bonne séparation des cimes des arbres (figures 5a, b), bien que souvent incomplète. Puis un procédé à base de règles examine individuellement les arbres potentiels et suit la limite de la cime dans le sens des aiguilles d'une montre en cherchant à délinéer des zones fermées. Des règles d'ordre supérieur permettent de prendre des décisions quant à l'utilisation d'outils additionnels pour séparer ou regrouper davantage ces zones fermées (figure 5c). À partir de ce stade, les cimes individuelles (ou les groupes d'arbres sur des images de moins bonne résolution) sont considérées et traitées comme des objets distincts dans toutes les analyses ultérieures. Avec un jeu de données multispectrales, les cimes passent par un procédé de génération de signatures d'espèces, puis par un procédé de classification permettant d'identifier les espèces présentes. Cependant, même sur une image panchromatique, de l'information forestière intéressante peut déjà être extraite à ce stade de l'analyse. Par exemple, l'image thématique (*bitmap*) résultant de la délinéation individuelle des cimes peut être utilisée pour analyser la fermeture du couvert, la densité des tiges, les dimensions des cimes et les trouées dans la forêt. L'algorithme de suivi des vallées et le programme subséquent à base de règles ont été décrits par Gougeon (1995b). Nous aborderons ici des considérations pratiques liées à leur utilisation.

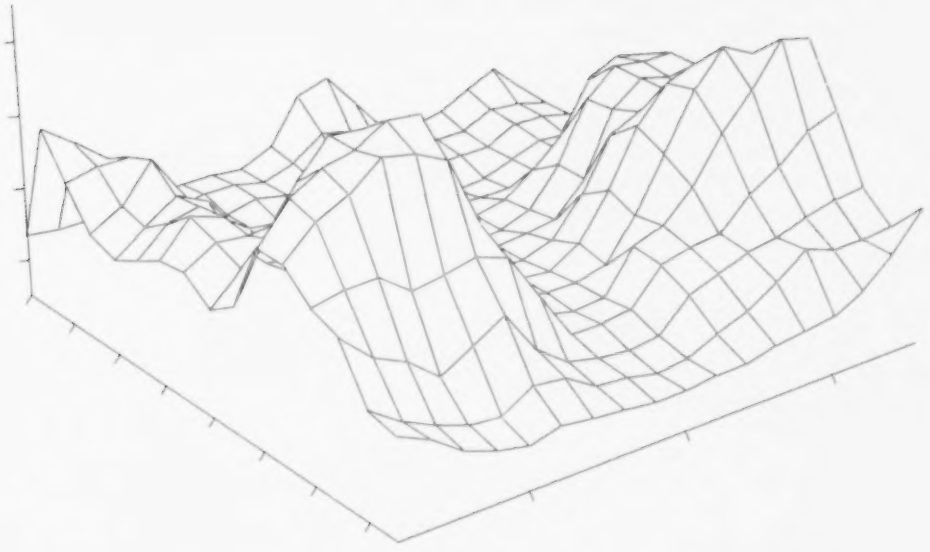


Figure 4 – *Vue tridimensionnelle d'une petite partie (16 × 20 pixels) d'une image représentant les cimes plus brillantes comme des montagnes souvent séparées par des vallées d'ombre (d'après Gougeon, 1999).*

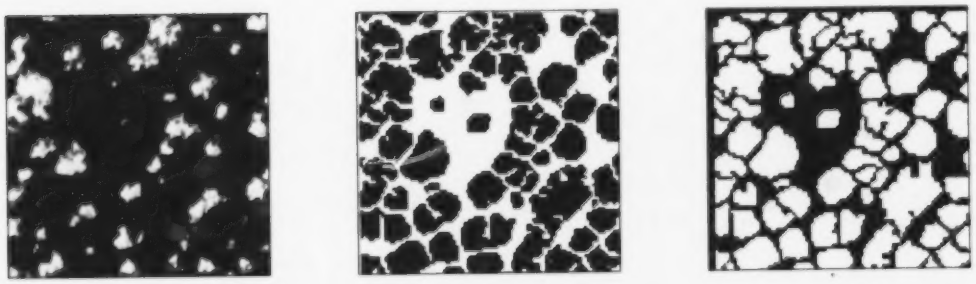


Figure 5 – **a)** *Partie (100 × 100 pixels) d'une image à 31 cm/pixel illustrant comment des cimes d'arbres peuvent nous apparaître distinctes dans des forêts de densité moyenne à élevée où elles sont habituellement séparées par des zones d'ombre (d'après Gougeon, 1995b).*

b) *Résultats de l'exécution du programme de suivi des vallées (ITCVFOL). De grandes étendues ombragées ont été masquées au moyen du seuil inférieur et les vallées ombragées ont été suivies pour tenter de séparer les cimes (d'après Gougeon, 1995b).*

c) *Résultats de l'exécution du programme de délinéation des cimes à base de règles (ITCISOL). À l'aide du facteur de saut, des échancrures dans des groupes d'arbres ont été allongées, ce qui a mené à la séparation d'un plus grand nombre de cimes (d'après Gougeon, 1995b).*

Depuis les bords des étendues masquées et depuis des minimums locaux initiaux à l'intérieur des étendues boisées, le procédé de suivi des vallées (ITCVFOL, voir figure 1) permet de suivre, pixel par pixel, de multiples chemins dans les petits corridors d'ombre qui existent entre les cimes des arbres plus brillantes. Le procédé repose actuellement sur trois seuils. Bien que des efforts aient été faits pour en rendre la sélection automatique, les résultats ne sont pas toujours entièrement satisfaisants. Il est possible de les introduire à la main ou même de les régler d'avance pour effectuer des traitements répétitifs ou par lots. Il est important de comprendre le rôle des seuils et leurs effets secondaires pour assurer une meilleure délinéation des cimes.

Le premier seuil, généralement appelé *seuil inférieur*, permet d'éliminer du traitement les étendues dépourvues d'arbres importants et celles qui se trouvent essentiellement à l'ombre (p. ex., les trouées entièrement ombragées dans la forêt). Il est utilisé comme simple seuil sur toute l'image et permet de masquer tout pixel présentant un niveau de gris inférieur à sa valeur. Ceci accélère le traitement et empêche l'algorithme de suivi des vallées de créer des vallées inutiles et vides de sens à l'intérieur de ces étendues. Si une valeur trop élevée est attribuée à ce seuil, les parties ombragées des cimes peuvent également être masquées, ce qui entraîne une mauvaise délinéation des cimes ainsi que des mesures inappropriées de leur surface. Si on lui attribue une valeur trop faible, cela peut nuire à la séparation des cimes à l'intérieur des groupes d'arbres (Gougeon, 1999). Ces effets sont plus ou moins prononcés selon la limite de résolution radiométrique de l'image.

Pour ces raisons, une manière convenable de fixer le *seuil inférieur* consiste à estimer, sur différentes parties de l'image, quel niveau de gris permet généralement de faire la différence entre les côtés ombragés des cimes et les étendues avoisinantes davantage ombragées. Cela peut s'avérer difficile, puisque les images sont rarement uniformes (en raison par exemple de voiles atmosphériques locaux, de différences d'angles de vue, etc.) et que la densité de la forêt ainsi que sa composition en espèces influent également sur cette valeur. Fort heureusement, en pratique, la sélection du seuil inférieur n'est pas trop déterminante en ce qui concerne la plupart des applications. Elle pourra s'avérer davantage importante si des mesures précises des diamètres des cimes sont nécessaires pour faire l'estimation du cubage « à l'arbre près ». Il faudra alors envisager d'utiliser un algorithme permettant de modifier le seuil de manière adaptive.

Le deuxième seuil, généralement appelé le *seuil supérieur*, a comme fonction d'aider à distinguer les vallées utiles à la séparation des cimes d'arbres de celles qu'on trouve généralement à de plus grandes résolutions spatiales (10-40 cm/pixel) et qui ont tendance à séparer les cimes en plusieurs parties, particulièrement dans le cas d'espèces présentant des cimes en forme d'étoile comme l'épinette de Norvège (*Picea abies* [L.] Karst). Ce seuil n'est d'intérêt qu'en présence de ces situations. Dans de tels cas, l'utilisateur peut facilement choisir un *seuil supérieur* en examinant les diverses situations de ce genre sur l'image. Rappelons qu'en raison du caractère simpliste des seuils, une solution plus souple serait sans aucun doute souhaitable. D'autre part, l'implantation de règles de regroupement sophistiquées dans la deuxième partie du procédé de délinéation des cimes, le système expert, pourrait rendre archaïque l'utilisation de tels seuils.

Le troisième seuil, généralement appelé *seuil de rugosité des vallées*, est une mesure de la quantité d'instabilité radiométrique à laquelle on devrait s'attendre et qu'on peut tolérer dans les vallées. La vallée ombragée entre deux cimes ne constitue habituellement pas un milieu uniforme et simple : du bruit provenant d'un capteur peut être présent dans les étendues sombres de l'image, des branches d'arbres basses peuvent s'avancer jusqu'au houppier d'un arbre voisin, des matériaux du sous-étage peuvent être faiblement éclairés et d'autres éléments de l'image peuvent compliquer la délinéation des cimes. L'algorithme de suivi des vallées progresse d'un pixel ombragé à l'autre (en commençant avec les minimums locaux dans les parties boisées de l'image) en cherchant devant le pixel un pixel de faible valeur situé entre deux pixels de valeur plus élevée dont on suppose qu'ils font partie de cimes situées de part et d'autre de la vallée. Cependant, les vallées n'ayant pas toujours la largeur d'un pixel, il faut prévoir les situations dans lesquelles les fonds des vallées présentent une largeur de quelques pixels. Ces fonds de vallées peuvent ne pas présenter partout exactement le même niveau de gris. Le seuil de *rugosité des vallées* précise la plage de différences de niveaux de gris (généralement 1, 2 ou 3 pour les images 8 bits) qui seront tolérées. On doit généralement lui attribuer une valeur plus élevée pour les capteurs offrant une plus grande résolution radiométrique. En général, puisqu'un seuil plus élevé facilite la progression dans les vallées, des seuils plus élevés pourront indiquer des vallées à des endroits où des seuils moins élevés n'en indiqueraient pas (ou indiqueraient des vallées interrompues) et ainsi, séparer davantage de cimes. Cependant ceci donne des vallées plus larges et entraîne une sous-estimation de la surface des cimes.

La deuxième partie de la délinéation individuelle des cimes est exécutée par un programme à base de règles (ITCISOL, voir figure 1) utilisant les résultats fournis par l'algorithme de suivi des vallées. Pour chaque 2 x 2 pixels de feuillage, le programme cherche à gauche la plus proche bordure et tente de suivre la bordure d'une cime potentielle en favorisant les virages dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à revenir à sa position initiale (ce qui indique une fermeture). Cela

fonctionne bien pour les cimes déjà bien séparées par le procédé de suivi des vallées. Cependant, parce que les vallées sont parfois interrompues (par exemple par une branche dépassant d'un houppier pour atteindre le houppier voisin), le programme comporte des règles d'ordre supérieur permettant de décider s'il faut colmater ou non ces interruptions. Un paramètre fixé par l'utilisateur, le *facteur de saut*, indique au programme combien de pixels il peut colmater. L'utilisateur n'a qu'à préciser s'il s'agit d'une forêt mûre ou d'une forêt en voie de régénération. Dans les forêts mûres, des sauts d'une longueur pouvant atteindre 1 m sont permis (calculés en pixels par le système) et, dans les forêts en voie de régénération, des sauts d'une longueur pouvant atteindre 0,5 m sont permis. Le programme comprend en autre un mode « d'entrée directe » avec lequel l'utilisateur peut préciser la distance en pixels. D'autre part, le programme tente de détecter, d'après des règles de niveau supérieur, d'autres situations dans lesquelles ont été délinéés des groupes d'arbres plutôt que des arbres individuels (les groupes d'arbres sont fréquents sur les images de plus faible résolution, de l'ordre de 80 à 100 cm/pixel par exemple). Tirant avantage d'indentations sur les bordures de groupes d'arbres comme indication des endroits possibles où les séparer en cimes individuelles, le programme réussit à subdiviser certains des groupes d'arbres. Divers autres critères et algorithmes de séparation sont évalués. Aucun n'est dépourvu d'effets secondaires. Des règles de niveau supérieur visant à identifier et à regrouper des segments de houppiers en une même cime n'ont pas encore été mises en œuvre. Elles seraient des plus utiles pour les cimes de feuillus sur les images à plus grande résolution (c.-à-d., de 10 à 30 cm/pixel). Lorsque toutes les possibilités offertes par les règles existantes ont été épuisées, le programme traite de nouveau l'image à plusieurs reprises, réussissant à délinéer de nouvelles cimes à chaque exécution, jusqu'à ce que peu d'améliorations soient apportées. Il génère ensuite une image thématique des cimes et des « îlots » (groupes d'arbres) qui restent (figure 6). Ceux-ci seront traités comme « objets » dans toutes les analyses subséquentes.

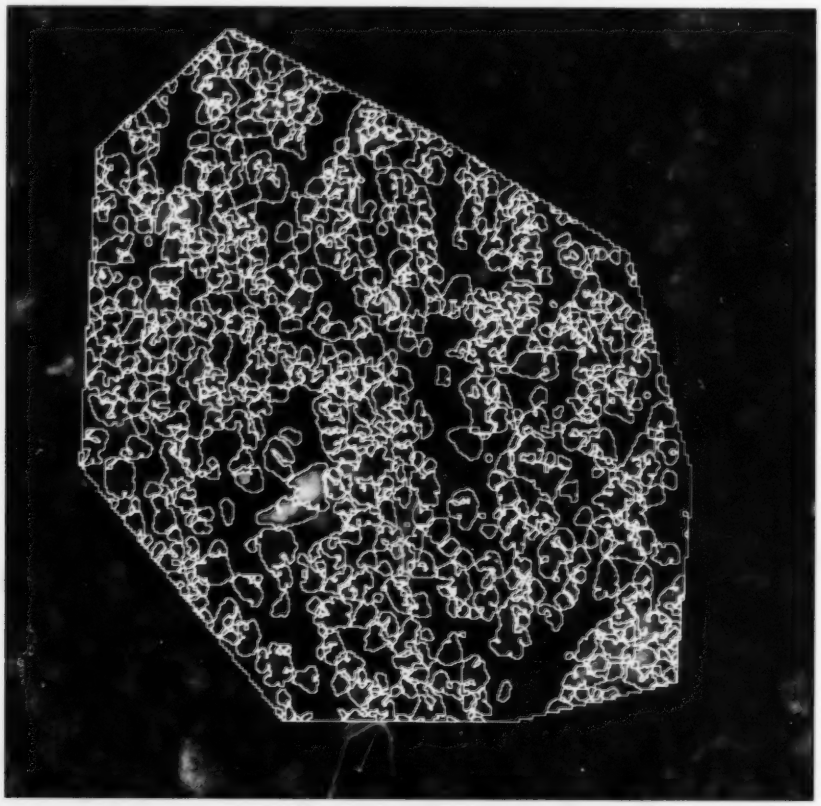


Figure 6 – *Cimes individuelles(ITCs) et groupes d'arbres (îlots) restants délinéés d'après la photographie panchromatique numérisée (1 m/pixel) d'une zone échantillon. Ici, l'image thématique caractéristique produite par exécution séquentielle des programmes ITCVFOL et ITCISOL est présentée sous forme vectorielle afin de permettre à l'image de paraître par transparence à travers les houppiers pour souligner les détails de la délinéation résultante.*

Classification individuelle des cimes

Avec des images multispectrales, les cimes ou les îlots délinéés sont habituellement traités au moyen d'un procédé de classification dirigée qui vise à identifier leur espèce. Typiquement, des zones d'entraînement présentant une seule espèce dans une situation particulière sont délinéées sur l'image afin de permettre la génération d'une signature représentative des cimes de chaque classe d'intérêt. D'après l'image thématique de cimes générée par ITCISOL, le procédé de génération des signatures (ITCSSG, voir figure 1) extrait les cimes individuelles à l'intérieur des zones d'entraînement, génère une signature spécifique pour chaque cime et les combine en signatures de classes. Dans le cas de forêts très mélangées, il est également possible de créer des signatures d'espèces en choisissant des cimes individuelles plutôt que d'utiliser des zones d'entraînement « impures ». Typiquement, la moyenne des moyennes multispectralse des cimes et la covariance de ces moyennes sont utilisées comme signature multispectrale. Cependant, avec la création d'un masque *a priori* (au moyen du programme ITCMG), il est possible de générer des signatures basées uniquement sur les pixels de la cime du côté éclairé des arbres, ce qui donne en général de meilleures classifications. Par la même approche, il est possible de n'utiliser que le côté ombragé des cimes ou que le pixel le plus brillant à l'intérieur d'une cime. En complément, ou en remplacement, de ces signatures multispectrales plus typiques, on peut générer de nombreux autres types de signatures qui tiennent compte de la texture, de la structure ou d'autres caractéristiques des images. Le contexte peut également être pris en considération en introduisant des néocanaux supplémentaires comme l'altitude numérique, la pente et l'exposition ou l'angle de visée du capteur, etc. La création d'un système d'identification « à l'arbre près » tenant compte de manière intelligente de tous ces facteurs fera l'objet de futures recherches.

Le procédé de classification (ITCSC) actuel fait intervenir une règle de décision basée sur le maximum de vraisemblance. Les cimes sont prélevées une à une de l'image thématique de cimes. Leur signature est calculée en utilisant les mêmes éléments caractéristiques et paramètres que dans le procédé de génération des signatures de classes. La vraisemblance de leur appartenance aux diverses classes est calculée et une décision finale est prise en prenant en considération un intervalle de confiance. C'est à dire qu'une cime est attribuée à la classe présentant la signature la plus apparentée, à moins que cette signature ne soit si distante qu'on perde toute confiance dans cette attribution. Dans ce cas, la cime est laissée non classifiée. Lorsque tous les arbres ont été classifiés, les résultats peuvent être affichés et évalués. Les méthodes d'évaluation formelles décrites ci-après (voir la section suivante sur les évaluations de l'exactitude) sont habituellement appliquées après l'obtention d'une classification convenable. Jusque-là, des moyens plus informels sont souvent utilisés pour évaluer la classification et décider si elle doit être améliorée et comment l'améliorer. Par exemple, des photographies aériennes de la région ou un ancien inventaire forestier peuvent être utilisées pour évaluer les faiblesses de la classification actuelle. Les classifications sont rarement adéquates dès le premier essai.

Beaucoup de facteurs peuvent influencer les résultats d'une classification et il existe de nombreuses manières de les améliorer. Un des facteurs les plus importants est le choix de classes convenables. Par exemple, il peut être préférable de regrouper en une même classe des espèces difficiles à distinguer les unes des autres (comme le peuplier et le bouleau), à moins de pouvoir tolérer l'incertitude restante. Le nombre d'espèces qu'on cherche à distinguer en fonction des limites de résolution spectrale et radiométrique du capteur peut également constituer un facteur. En général, pour un capteur donné, plus on souhaite séparer de classes et moins la classification est bonne. Certains de ces facteurs peuvent être évalués avant le procédé de classification au moyen de programmes évaluant la séparabilité des signatures (p. ex., l'ITCSSBD - Species Signature Bhattacharyya Distances [distances de Bhattacharyya entre les signatures des espèces]). Ceux-ci permettent d'établir les canaux ou les caractéristiques les plus importants quant à la séparabilité et indiquer le degré de séparabilité des classes.

L'approche habituelle consiste à affiner (« purifier ») les zones d'entraînement ou à sélectionner des arbres individuels afin de produire des signatures plus précises, mieux définies. Cette approche vise à s'assurer que les zones d'entraînement ne renferment aucun arbre d'une autre espèce ou à supprimer les individus qui constituent des valeurs aberrantes. Une autre méthode consiste à prendre en considération de l'information additionnelle. Par exemple, si les épinettes blanches sur les pentes face au nord semblent différentes des autres épinettes blanches, on peut créer deux classes distinctes, intégrer un modèle de terrain numérique à la classification, appliquer une classification distincte à toutes les zones face au nord ou encore utiliser une combinaison de ces approches. Des facteurs environnementaux peuvent en outre engendrer toute une gamme de problèmes. Les nuages sont de toute évidence problématiques, tout comme les ombres qu'ils projettent. Bien que certains capteurs ayant une grande résolution radiométrique puissent permettre d'analyser les forêts couvertes d'ombre, celles-ci doivent habituellement faire l'objet d'une classification entièrement distincte et l'exercice est souvent peu réussi. La diffusion atmosphérique constitue un facteur environnemental encore plus subtil pour lequel il est extrêmement difficile de compenser. De plus, l'analyste d'images ignore souvent la présence problématique de cet élément.

Évaluations de l'exactitude

En télédétection, la méthode qui prévaut pour évaluer l'exactitude d'une classification consiste à délinéer des zones de vérification (similaires aux zones d'entraînement utilisées pour générer les signatures des classes, mais indépendantes d'elles) à partir desquelles une matrice de confusion (ITCCA, voir figure 1) est calculée. Une ou plusieurs zones de vérification (idéalement au contenu le plus pur possible) sont délinéées pour chacune des classes de la classification. À l'intérieur de chacune de ces zones (représentatives d'une seule classe), la composition en classes donnée par la classification est déterminée et signalée. L'exactitude de la classification, pour une classe donnée, correspond à la proportion des arbres, à l'intérieur de la zone de vérification correspondante, qui sont attribués à la bonne classe. La matrice de confusion fournit en outre de l'information sur les erreurs d'assignation (cimes appartenant à d'autres zones de vérification qui sont assignées à cette classe) et les erreurs d'omission (cimes à l'intérieur d'une zone de vérification qui sont assignées à une classe différente). La matrice de confusion relative à la classification de la région de Nahmint, exposée dans Gougeon et coll. (1999), est présentée au tableau 1. Pour ce projet, la sélection des zones d'entraînement et des zones de vérification a été très facile, puisque cette région était constituée de peuplements de plantations qui ne renfermaient, théoriquement, que des arbres d'une seule espèce. L'application de cette méthode à une forêt plus naturelle exigerait des compétences en interprétation (ou de l'information additionnelle) pour déterminer les zones contenant des arbres d'une seule espèce sur l'image ou, de préférence, sur des photographies aériennes à une échelle plus convenable. Des variantes de cette méthode consistent à choisir des cimes de vérification individuelles plutôt que des zones de vérification, ou à traiter des zones de vérification dont on sait qu'elles renferment des arbres de plus d'une espèce, dans la mesure où la composition en espèces de ces zones est connue.

D'autres procédures d'évaluation de l'exactitude, qui peuvent s'avérer plus attrayantes et crédibles pour les forestiers, consistent à comparer la composition en espèces obtenue par l'analyse « à l'arbre près » d'un peuplement donné à celle rapportée dans un inventaire forestier existant ou à celle obtenue de transects au sol à l'intérieur de ce peuplement. Utilisant des polygones (et des attributs) de peuplements existants, le programme ITCPCD (ITC Polygon Content Description [description du contenu d'un polygone]) peut fournir leur composition en espèces et divers autres attributs de peuplements et de cimes individuelles. La comparaison avec les attributs d'inventaire de peuplements existants est alors facile. De telles comparaisons illustrent de manière saisissante la précision, l'exactitude et l'utilité des analyses « à l'arbre près » à partir d'images à haute

Tableau 1 – *Exemple de matrice de confusion provenant de la classification des cimes dans la région de Nahmint en Colombie-Britannique (d'après Gougeon et coll., 1999). L'exactitude moyenne était de 59,8 %.*

	Espèces nominales					
	Douglas taxifolié	Sapin grandissime	Sapin gracieux	Thuya géant	Pruche occidentale	Feuillus
Cimes	108	100	40	102	106	72
Espèces détectées						
Douglas taxifolié (*Pseudotsuga menziesii*)	**69(63,9 %)**	16(16,0 %)	3 (7,5 %)	35 (34,3 %)	12 (11,3 %)	0 (0,0 %)
Sapin grandissime (*Abies grandis*)	10 (9,3 %)	**59(59,0 %)**	10 (25,0 %)	9 (8,8 %)	3 (2,8 %)	0 (0,0 %)
Sapin gracieux (*Abies amabilis*)	12 (11,1 %)	21 (21,0 %)	**28 (57,5 %)**	27 (26,5 %)	2 (1,9 %)	0 (0,0 %)
Thuya géant (*Thuja plicata*)	2 (1,9 %)	3 (3,0 %)	2 (5,0 %)	**28 (27,4 %)**	1 (0,8 %)	13 (18,1 %)
Pruche occidentale (*Tsuga heterophylla*)	15 (13,9 %)	1 (1,0 %)	2 (5,0 %)	3 (2,8 %)	**88 (83,0 %)**	9 (12,5 %)
Feuillus – principalement aulne (*Alnus rubra*)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	**49 (68,1 %)**
Non classifié	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	1 (1,4 %)

résolution (comme le démontre la section ci-après sur les applications), mais elles sont limitées par la précision des inventaires actuels.

Une comparaison (au moyen du programme ITCCAF) de la composition en espèces « à l'arbre près » à celle relevée sur des transects au sol à l'intérieur de nouveaux peuplements générés automatiquement a été faite dans un rapport rédigé par Gougeon et coll. (1999). Elle illustre la puissance de l'analyse « à l'arbre près », puisqu'en moyenne, la composition en espèces obtenue n'est erronée que de 10 % pour l'espèce principale et de 14 % pour toutes les autres espèces occupant plus de 25 % d'un peuplement donné. Cependant, à l'examen de ces encourageants résultats, il faut garder à l'esprit le caractère particulier du site expérimental : plantations relativement uniformes d'arbres plutôt jeunes d'une même espèce. Bien que des cimes plus jeunes puissent être plus difficiles à isoler en raison de leur petite taille, elles présentent souvent une très bonne séparabilité spectrale en espèces. Les arbres plus vieux, avec leur cime moins compacte, leurs problèmes de santé et leur éclairement incohérent en raison de cimes plus ouvertes et de diverses situations de dominance peuvent être plus difficiles à classifier.

Compte tenu du fait que la comparaison mentionnée précédemment a été faite pour la même classification individuelle des cimes que celle du tableau 1, elle illustre également la faiblesse classique des évaluations simples effectuées par zones de vérification : ces évaluations se basent sur l'hypothèse qui veut que les zones de vérification soient pures et non contaminées par des espèces autres que l'espèce désignée. Les résultats relatifs moins concluants dans ce cas sont attribués à la présence d'arbres d'autres espèces à l'intérieur de peuplements en principe purs.

Une autre procédure d'évaluation de l'exactitude (au moyen du programme ITCMARA), davantage orientée vers la recherche, suppose la comparaison de cimes d'arbres, leur espèce et leur emplacement (et même leur surface) provenant de parcelles de terrain détaillées avec les résultats de l'analyse informatique. Cela permet un paramétrage distinct des exactitudes de délinéation et de classification ainsi que de la précision de la délinéation. Cependant, une information extrêmement détaillée sur les parcelles est nécessaire, suivie d'exigeantes délinéations de cimes faites à la main à l'écran. Une procédure d'évaluation de l'exactitude aussi complexe est nécessaire pour quantifier entièrement le rendement d'une analyse « à l'arbre près » à des fins de recherche et pour évaluer les forces et les faiblesses de toute amélioration des logiciels. Elle est en outre extrêmement utile pour quantifier le rendement possible avec divers médias et à diverses résolutions spatiales.

Regroupement des cimes et création de peuplements

Les peuplements forestiers jouent un rôle essentiel en aménagement forestier. Il serait sans doute très difficile d'amener les forestiers d'Amérique du Nord à adopter un nouveau paradigme basé sur les arbres individuels. De toute façon, les systèmes d'information géographiques restent limités quant au nombre de polygones qu'ils peuvent raisonnablement traiter. En outre, le stockage d'information concernant tous les arbres d'une province engendrerait une base de données de proportions gigantesques. Le transfert de cette information serait par ailleurs problématique.

Pour ces raisons et bien d'autres, le regroupement en peuplements forestiers de l'information « à l'arbre près » reste nécessaire. Ces regroupements peuvent être fondés sur :

a) les peuplements d'un inventaire forestier existant (mis à jour pour tenir compte des changements récents);

b) de nouveaux peuplements générés par des méthodes classiques d'interprétation de photographies;

c) des peuplements générés automatiquement d'après la composition en espèces, la densité des tiges et la fermeture du couvert provenant de l'analyse « à l'arbre près »;

d) des peuplements générés automatiquement d'après des paramètres de texture et leur classification;

e) des peuplements générés automatiquement d'après une segmentation spectrale et texturale de l'image;

f) des regroupements sur mesure en fonction de la biodiversité, de la gestion de la faune ou de l'application en cause.

Les approches *a*) et *b*) s'intègrent bien aux procédures actuelles de génération d'inventaires forestiers appliquées par la plupart des gouvernements provinciaux et des sociétés forestières. Un sommaire de la composition en espèces, de la densité des tiges et de la fermeture du couvert « à l'arbre près », fait de cette manière, peut susciter la confiance des personnes les plus étroitement concernées par les inventaires forestiers (voir la section sur les applications). Une méthodologie de regroupement des cimes, *c*), a été décrite par Gougeon et coll. (1999). Elle consiste à générer des images grossières de la fermeture du couvert et de la densité des tiges pour chaque espèce et à les soumettre à un procédé de classification non dirigée par pixel dans lequel les classes correspondent à toute une gamme de types de peuplements présentant des compositions en espèces et des densités différentes (figure 2). Les classes sont regroupées jusqu'à ce que le niveau de détails souhaité soit atteint. Les régions plus petites qu'un minimum statutaire sont fusionnées avec les peuplements dominants, puis une transformation en vecteurs est exécutée. Cette méthodologie permet généralement d'obtenir une très bonne délinéation des peuplements (davantage discutée dans la section sur les applications). Un des inconvénients possibles de cette méthode est que les peuplements risquent de ne pas traverser les routes. Ils peuvent également être sensibles à la présence de cours d'eau. Cependant, si cela est souhaitable, il est facile de regrouper des peuplements voisins présentant un contenu similaire lors d'un traitement automatique subséquent par un système d'information géographique. Une autre des faiblesses découle de l'hypothèse principale sur laquelle repose notre technique de délinéation des cimes, la présence d'ombre entre les cimes des arbres, qui empêche pour le moment l'analyse d'étendues relativement dégagées. Pour ne pas confondre le procédé de délinéation des cimes, ces étendues sont masquées avant l'analyse « à l'arbre près » et ne peuvent ainsi être disponibles pour une analyse plus poussée dans le cadre du procédé de délinéation des peuplements.

D'assez bons peuplements forestiers peuvent également être obtenus par la classification de caractéristiques texturales *d*) ou par l'application d'un procédé de segmentation *e*) qui tiendrait compte de l'information spectrale et texturale (Gougeon et Wong, 1986; Definiens Inc., 2000). Les procédés de segmentation, qu'ils reposent sur le suivi des bordures ou l'agrandissement des régions, auront souvent tendance à créer des limites de peuplements suivant les lits des cours d'eau ou les entités géologiques, bien que les meilleurs puissent donner un certain contrôle à l'utilisateur. Ils sont généralement conçus de manière à détecter des objets distincts, et les limites complexes comme celles que relèvent habituellement les interprètes forestiers leur posent des problèmes (Leckie et coll., 2002a). Une classification non dirigée de paramètres de texture peut souvent donner de meilleurs résultats. Puisque les paramètres de texture sont habituellement extraits de parcelles d'image, les peuplements peuvent souvent franchir des entités de petite taille comme les routes ou les cours d'eau. Cependant, cette approche ne prend pas directement en considération les espèces. Les efforts d'intégration d'une composante multispectrale à une telle analyse sont habituellement futiles, puisqu'il devient très difficile d'établir un équilibre entre l'information spectrale et l'information texturale. Cette approche mène habituellement à une classification par espèce plutôt qu'à la délinéation des peuplements.

Des regroupements sur mesure originaux *f*) sont également possibles et pourraient devenir un avantage important de l'utilisation de l'approche « à l'arbre près ». Par exemple, l'analyse « à l'arbre près » d'une région peut fournir de l'information très précise sur la position et la grandeur des trouées du couvert forestier, ainsi que sur leur répartition spatiale. Cette information devrait être d'importance pour la gestion de la faune, puisque les petits et les gros mammifères ont des préférences quant aux trouées du couvert. L'analyse « à l'arbre près » pourrait en outre faciliter la détermination de la largeur à donner aux zones tampons riveraines (Paradine et coll., 1999). Les forestiers peuvent facilement trouver de nombreuses applications où les décisions pourraient reposer, directement ou indirectement, sur de l'information « à l'arbre près ».

Les techniques de regroupement des types *c*, *d*, *e* et *f* font actuellement l'objet de recherches. Lorsque parfaitement au point, elles devront être évaluées dans les règles afin de déterminer si elles sont acceptables pour les instances nationales et provinciales, ainsi que pour les sociétés forestières qui sont de plus en plus responsables des inventaires forestiers. Cependant, même si ces techniques automatisées ne respectent pas toutes les normes, elles pourraient néanmoins avoir un important rôle à jouer dans les procédures assistées par ordinateur de délinéation des peuplements. Quelle que soit la technique de regroupement utilisée ou jugée adéquate, l'approche « à l'arbre près » permet d'établir des compositions en espèces précises et de nombreuses autres statistiques intéressantes au sujet des peuplements. Avec le temps, les exigences liées à l'aménagement forestier contemporain et l'accroissement incessant de la puissance des ordinateurs permettront d'aller au-delà de ces regroupements statiques et de conserver la totalité de l'information concernant les cimes individuelles (p. ex., leur position, leur diamètre, leur hauteur, leur espèce et leur dominance). Les regroupements pourront alors être exécutés sur demande, pour chaque application particulière, si le besoin existe encore.

Détection du faîte des arbres

Une approche « à l'arbre près » n'implique pas toujours la délinéation complète des cimes, leur classification et leur regroupement. D'intéressants attributs des forêts peuvent être extraits par des méthodes plus simples comme celles basées sur la très populaire méthode des maximums locaux ou « de détection du faîte des arbres » (Gougeon et Moore, 1989). Celle-ci est souvent utilisée avec des images à plus faible résolution (1-2 m/pixel) pour établir la position des arbres, les dénombrer, ou déterminer leur densité ou même leur espèce. Elle est également appliquée aux arbres plus petits sur les images à haute résolution (30 cm/pixel), par exemple dans les zones en tout début de régénération (Gougeon, 1997). Elle consiste à balayer une image d'éclairement avec une fenêtre de dimensions fixes (p. ex., 3 × 3, 5 × 5 ou 7 × 7 pixels) et à y détecter les pixels les plus brillants (ou maximums locaux) en espérant localiser un seul de ces pixels à l'intérieur de chaque cime d'arbre (voir figure 7). Elle donne généralement de bons résultats avec les houppiers de conifères observés près du nadir, où ces pixels sont souvent situés du côté ensoleillé des houppiers près du faîte des arbres (dont la technique tire son nom). La plupart des applications réussies de cette méthode se sont limitées à des dénombrements dans de telles circonstances idéales. En ce qui concerne les feuillus, qui présentent une structure plus arrondie, la relation n'est pas aussi directe, puisqu'il existe souvent plusieurs pixels brillants à l'intérieur de chaque cime. Les cimes de résineux observés à une distance importante du nadir posent souvent le même problème. Dans ces cas, la relation peut fortement dépendre des dimensions des cimes observées en fonction de la résolution spatiale de l'image et des dimensions de la fenêtre utilisée pour détecter les maximums locaux. Des méthodes qui s'adaptent localement (p. ex., Wulder et coll., 2000) permettent, dans une certaine mesure, d'atténuer ce problème en ajustant de manière dynamique la dimension de la fenêtre utilisée. Les forêts mixtes, où sont observées toute une gamme d'espèces aux cimes de formes et de dimensions variées, posent un réel défi à l'application de telles techniques. Dans des situations complexes, les dénombrements d'arbres sont généralement peu fiables. La reconnaissance des espèces reste cependant souvent possible. En fait, les pixels constituant les maximums locaux à l'intérieur de chaque cime restent parmi les pixels les plus purs et se classifient généralement bien.

La technique de détection du faîte des arbres (appliquée au moyen du programme TREETOPS) exige essentiellement le même prétraitement que l'approche de la délinéation des cimes par suivi des vallées (voir la section sur le prétraitement). Une image d'éclairement est choisie ou créée, puis lissée. Les étendues non boisées sont masquées. À l'intérieur des étendues

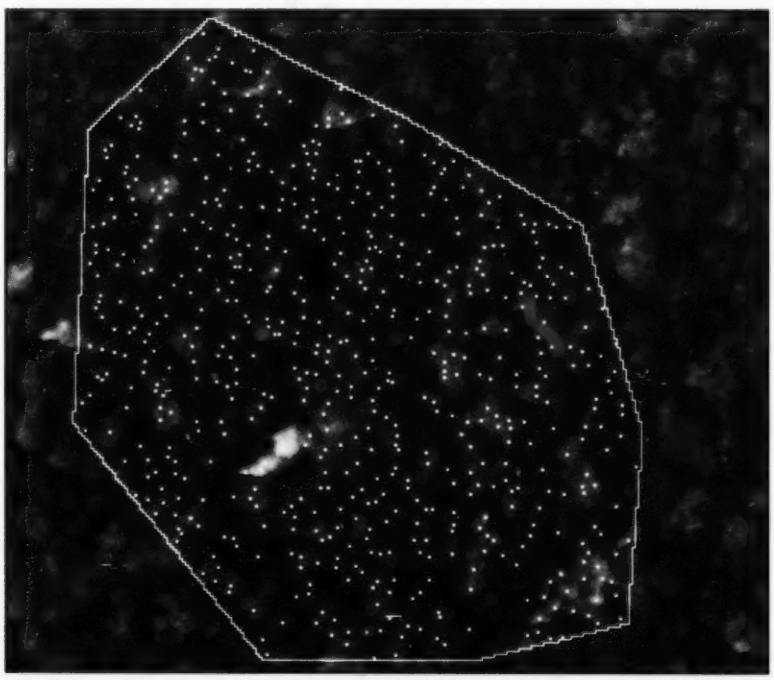


Figure 7 – *La technique de détection du faîte des arbres appliquée à l'étendue représentée sur la figure 6. À une résolution spatiale aussi « faible » (1 m/pixel), les résultats de l'algorithme TREETOP pourraient être utilisés dans l'ITCISOL pour aider à diviser les groupes d'arbres restants (îlots) en cimes individuelles (ITCs).*

boisées, un seuil est utilisé pour éliminer la plupart des pixels ombragés. Ce seuil est similaire au *seuil inférieur* mentionné précédemment, mais on peut habituellement lui attribuer une valeur plus élevée puisque les limites des cimes ne sont pas en cause dans ce cas. Il est aussi influencé par certains facteurs de modulation de l'éclairement comme la topographie, la diffusion atmosphérique ou l'espacement des arbres qui influent sur l'opacité de l'ombre entre les arbres. La technique est donc principalement utile dans les zones de résineux présentant une densité moyenne à élevée. Elle peut facilement être appliquée au dénombrement des arbres, même à partir de photographies aériennes panchromatiques numérisées (figure 7).

Pour traiter les arbres dans des zones plus clairsemées, une variante de la méthode de détection du faîte des arbres (appliquée au moyen du programme SHADOWTT), par laquelle on cherche une ombre spécifique à chaque cime d'arbre, a été mise au point (Gougeon et Leckie, 1999). En faisant intervenir la position du soleil comme paramètre d'entrée, on cherche, dans la direction opposée, un pixel sombre à associer à chaque maximum local. Cette technique a fourni d'excellents résultats en ce qui a trait à l'élimination d'arbres faussement détectés sur les matières en arrière-plan dans des étendues clairsemées (figure 8). Afin de traiter les deux situations, une méthode adaptative (appliquée au moyen du programme LATTOPS) permettant de passer par endroits de la technique classique à la technique de recherche d'ombres spécifiques associées aux cimes a également été mise au point. La commutation se base sur une analyse *a priori* de la directionalité qui permet de détecter les zones de directionalité élevée à un angle correspondant à l'éclairement par le soleil (c.-à-d. la directionalité élevée causée par les ombres spécifiques). Bien qu'il y ait un potentiel de problèmes aux limites entre les peuplements denses et clairsemés, cette méthode automatisée fournit généralement des dénombrements d'arbres plus exacts. Il pourrait aussi être possible d'appliquer une telle approche au paradigme de la délinéation de cimes entières, mais la séparation des côtés bien éclairés des cimes de l'arrière-plan souvent végétalisé et bien éclairé ne serait pas une mince affaire. La création d'une autre méthode localement adaptative qui passerait du paradigme de détection du faîte des arbres à celui de la délinéation des cimes d'arbres sur la base d'une estimation *a priori* des dimensions des cimes permettrait des analyses plus complètes et davantage automatisées de régions diversifiées étendues.

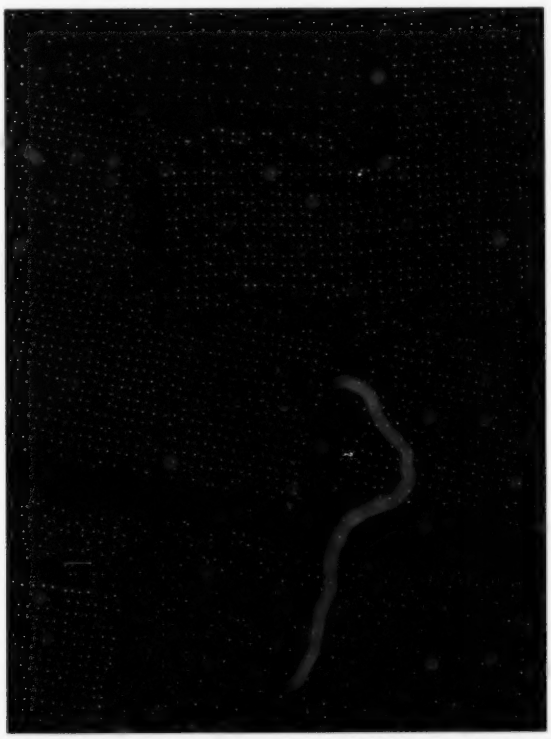


Figure 8 – *La technique adaptative de détection du faîte des arbres (LATTOPS) appliquée à une image aérienne à 30 cm/pixel d'une étendue en début de régénération (< de 10 ans). La détection d'une ombre spécifique à chaque arbre a fait une bonne différence pour les étendues en voie de régénération plus clairsemées au bas et au haut de l'image, ce qui a permis d'éliminer un grand nombre de fausses détections dans les zones herbeuses entre les arbres. La technique classique de détection des arbres (maximums locaux) convient très bien aux autres étendues – plus denses (adapté de Gougeon et Leckie, 1999).*

Applications aux inventaires forestiers

D'après ces brèves descriptions de techniques d'analyse d'images à haute résolution spatiale ayant pour objet la foresterie, il devient évident que de nombreux paramètres forestiers d'intérêt en matière d'inventaires d'aménagement ou à des fins d'exploitation peuvent facilement être extraits de telles images. Rien qu'à partir d'images panchromatiques (ou de photographies en noir et blanc numérisées), on peut déjà tirer de l'information sur la densité des tiges, la fermeture du couvert, le diamètre des cimes et sur la densité relative, alors que dans un proche avenir, on pourrait conserver la position des arbres individuels. Les images multispectrales offrent la possibilité d'obtenir une information précise sur la composition en espèces à quelques points de pourcentage près, mentionnant de manière explicite toutes les espèces minoritaires à l'intérieur de chaque peuplement. Il est également possible de faire des regroupements en peuplements forestiers davantage affinés que ceux qui sont utilisés actuellement ou, de conserver l'information provenant de l'analyse des cimes pour l'utiliser directement ou pour créer sur demande des regroupements adaptés aux applications. D'autres paramètres forestiers qui n'étaient pas disponibles jusqu'ici, comme la position et les dimensions des trouées (figure 9) ou la répartition et le raccordement des trouées, peuvent maintenant être facilement extraits, même sans classification des espèces. La répartition des trouées et celle des espèces peuvent être utilisées pour créer des cartes d'habitats fauniques potentiels. Les jeunes forêts, les peuplements mûrs et les vieilles forêts présentent une configuration différente de leurs trouées. La détection des chicots est souvent possible et elle est importante pour faire l'évaluation de régions quant à leur potentiel de nidification des oiseaux. L'évaluation de la défoliation ou de l'état de santé d'arbres individuels pourrait également présenter un intérêt, surtout dans le cas d'épidémies très localisées comme celles du pourridié des racines. La classification individuelle des cimes d'une image panchromatique en plusieurs classes pourrait même être utilisée en interprétation assistée par ordinateur ou entièrement automatisée de limites de peuplements. Enfin, une analyse « à l'arbre près » complète pourrait permettre la cartographie détaillée des zones riveraines, le débusquage juste-à-temps par hélicoptère de bois de grande valeur ou la modélisation « à l'arbre près » de la croissance et de la concurrence. De plus, les récents et prochains satellites à haute résolution spatiale (comme IKONOS et QuickBird) faciliteront tout le procédé d'analyse (c.-à-d., angles de champ plus étroits, moins de mosaïques photographiques) et permettront d'accélérer considérablement l'extraction d'information forestière.

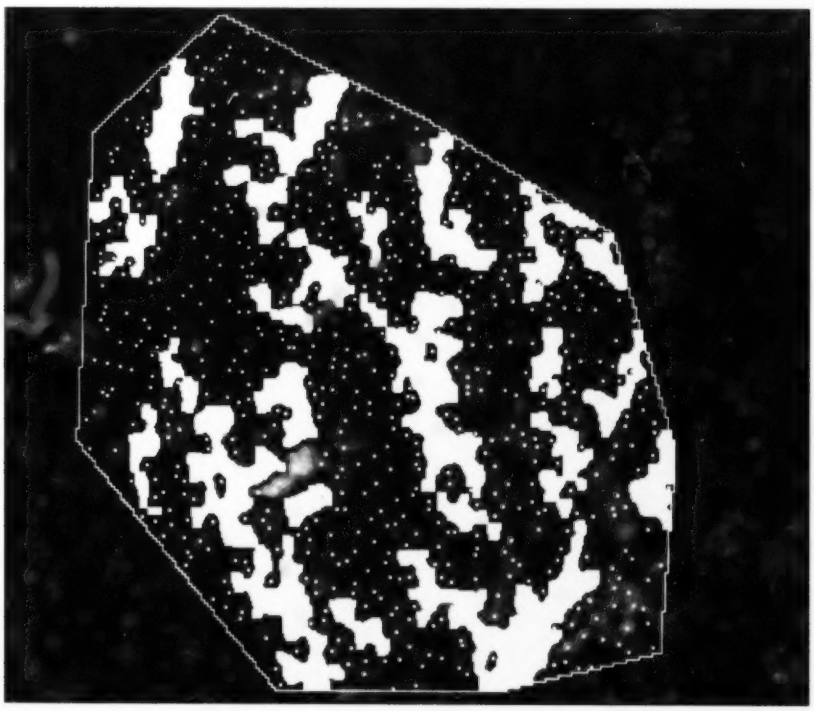


Figure 9 – *Même des images panchromatiques peuvent fournir automatiquement certains paramètres forestiers contemporains comme la position et les dimensions des trouées importantes. Ce type d'information n'est actuellement pas facilement disponible.*

Le but ultime visé par le développement de ces techniques d'analyse d'image « à l'arbre près » est la production en temps opportun d'inventaires forestiers détaillés, précis et fidèles. L'information basée sur l'analyse des cimes est tellement détaillée qu'elle peut être regroupée à différents niveaux d'abstraction afin de répondre à des besoins spécifiques en matière d'aménagement ou d'exploitation. Nous espérons que les approches « à l'arbre près » remplaceront progressivement les procédés d'interprétation de photographies actuellement utilisés partout au Canada. À long terme, la disponibilité d'information « à l'arbre près » pourrait modifier les fondements de l'aménagement forestier, qui s'effectuerait en fonction de l'arbre plutôt que du peuplement. Quand donc peut-on s'attendre à disposer d'inventaires forestiers basés sur l'analyse des cimes?

Les travaux menés au moyen d'images multispectrales aériennes d'une résolution de 31 cm/pixel ont démontré que dans des conditions idéales (plantations de résineux de densité moyenne et à cette haute résolution spatiale), 81 % des cimes délinéées par l'approche de suivi des vallées étaient les mêmes (1:1) que celles dénombrées par des photo-interprètes sur la même image (Gougeon, 1995b). La figure 10 illustre les possibilités du procédé de délinéation à de telle résolution spatiale. Bien sûr, si des images de plus faible résolution sont utilisées ou si la situation est plus complexe (étendues clairsemées ou feuillus, par exemple), ce rendement n'est habituellement pas possible. Par exemple, une analyse « à l'arbre près » d'une image IKONOS d'une résolution de 1 m/pixel ne permettra vraisemblablement pas des dénombrements fiables des arbres (figure 6). D'autre part, la présence de groupes d'arbres plutôt que de véritables cimes individuelles n'est pas nécessairement nuisible à une analyse de la composition en espèces ou à l'extraction de bonnes limites de peuplements. Elle pourrait même ne pas nuire à de bonnes évaluations des densités, puisque celles-ci pourraient être ajustées de manière à compenser une résolution spatiale donnée. De telles analyses d'images à l'arbre près, réalisées en esprit seulement puisque souvent basées plus sur des groupes d'arbres que sur des arbres individuels, pourraient quand même donner des inventaires forestiers nettement meilleurs que ceux obtenus par photo-interprétation.

La reconnaissance des espèces des cimes a également été couronnée de succès (figure 11). Dans nos travaux d'avant-garde, menés dans l'Est du Canada au moyen d'images aériennes multispectrales à une résolution de 36 cm/pixel (Gougeon, 1995a), l'exactitude de la classification des cimes de cinq espèces de résineux délinéées à la main a été de l'ordre de 73 %

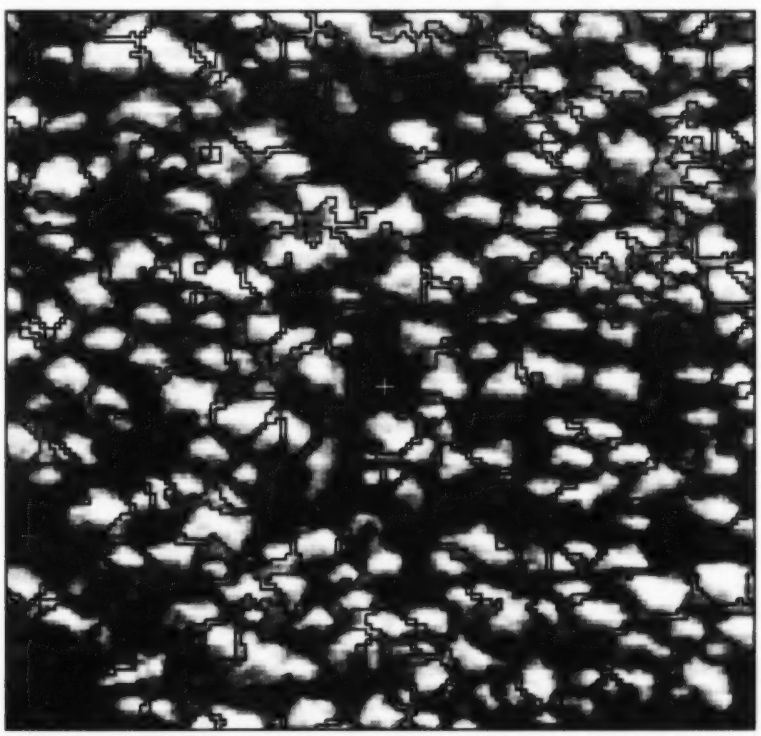


Figure 10 – *Exemple de délinéation individuelle de cimes réalisable avec une image (36 cm/pixel) provenant d'un capteur aéroporté. Il y a encore des groupes d'arbres (îlots), mais il n'en reste que très peu (adapté de Gougeon et Leckie, 2001).*

lorsqu'on l'a évaluée au moyen d'arbres de vérification indépendants. Plus récemment, une région de la Colombie-Britannique peuplée de cinq espèces côtières de résineux a été analysée d'après des données aériennes multispectrales à une résolution de 60 cm/pixel (Gougeon et coll., 1999). Les classifications dirigées de cimes délinéées automatiquement ont été comparées à des transects au sol dans 16 peuplements. En moyenne, on a constaté que les compositions en espèces dérivées de l'analyse différaient de 12 % de celles dérivées des transects. Cette proportion n'était que de 10 % dans le cas de l'espèce dominante et de 14 % pour toute espèce représentant plus de 25 % du peuplement. Il faut cependant garder à l'esprit que ces succès ont été obtenus dans des plantations de conifères relativement jeunes ne présentant que cinq espèces à différencier. Les arbres jeunes d'âge uniforme sont habituellement plus faciles à différencier entre eux que les arbres mûrs, pour lesquels l'état de santé et la variabilité de l'ouverture du couvert nuisent souvent à la reconnaissance des espèces (Leckie et coll., 1999c). Dans le cadre d'autres travaux prenant en considération davantage d'espèces, y compris des feuillus, on a obtenu des exactitudes moyennes des classifications de 56 % pour huit espèces de conifères et de 65 % pour trois espèces de feuillus (Leckie et Gougeon, 1999). Ces résultats se situent à moins de 15 % de ceux obtenus par des photo-interprètes utilisant les mêmes images. Même des capteurs de résolution spatiale moindre comme IKONOS, de 1 m/pixel dans la bande panchromatique et de 4 m/pixel sur les images multispectrales, peuvent fournir des résultats très encourageants en matière de reconnaissance d'espèces. Dans l'Ouest du Québec, deux régions de plus de 10 000 ha chacune ont été analysées au moyen de l'approche « à l'arbre près ». D'après des zones d'entraînement et de vérification relativement pures délinéées sur l'imagerie et contrôlées d'après des photographies aériennes, des exactitudes de classification de l'ordre de 75 % (de 56 à 91 %) ont été obtenues pour neuf classes (CLC-Camint, 2002).

Le regroupement automatique des cimes individuelles en peuplements forestiers plausibles et la génération d'attributs de peuplements comme la composition en espèces, la fermeture du couvert et la densité des tiges de ces peuplements (ou de peuplements classiques) constituent deux sujets d'intérêt majeur. Bien sûr, résumer l'information basée sur l'analyse des cimes pour chaque polygone de peuplement existant et la stocker sous forme d'attributs de polygones est un procédé simple. Lors de l'analyse récente « à l'arbre près » d'une image IKONOS, on a constaté que les compositions en espèces calculées pour chaque polygone de l'inventaire forestier provincial actuel correspondaient très bien avec celles de l'inventaire, et que

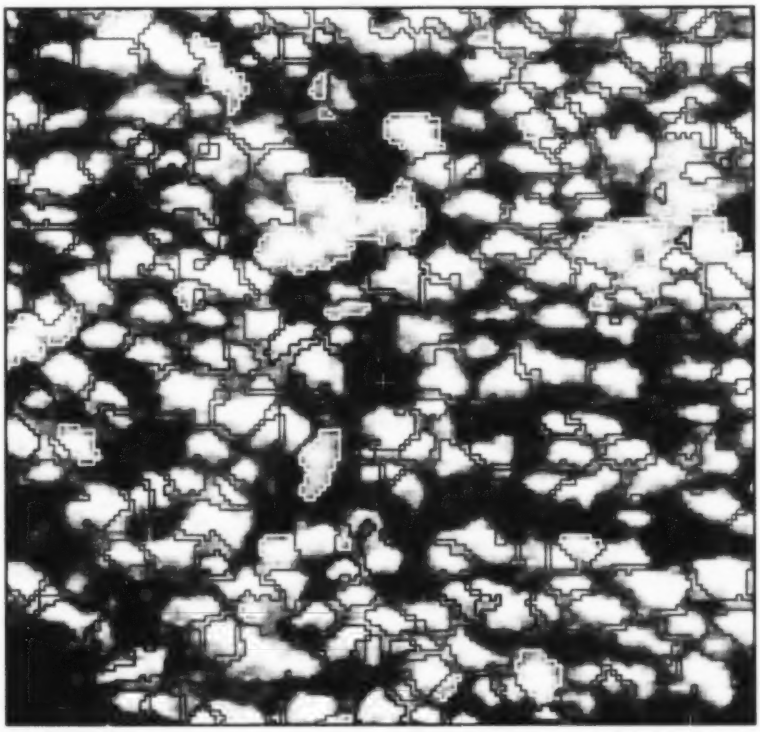


Figure 11 – *Les cimes individuelles de la figure 10 classifiées par espèce : épinette blanche (rouge), pin rouge (vert), épinette rouge (bleu) et pin blanc (jaune) (d'après Gougeon et Leckie, 2001).*

la précision était plus grande (CLC-Camint, 2002). Ceci pourrait sonner le glas des compositions en espèces par incréments de 10 % (parfois de 25 %) ne signalant que deux ou trois espèces principales, qui constituent la pratique courante dans la plupart des inventaires forestiers provinciaux au Canada (Leckie et Gillis, 1995). De plus, dans le cadre de la même étude, des peuplements ont aussi été générés automatiquement par la méthodologie décrite par Gougeon et coll. (1999). Une partie de cette image IKONOS est présentée en version proche infrarouge avec les limites des peuplements forestiers établies par la province à la figure 12, alors qu'on voit, à la figure 13, les résultats de l'analyse « à l'arbre près » avec les peuplements délinéés d'après les cimes individuelles. Les peuplements sont de formes remarquablement similaires, mais des détails supplémentaires s'ajoutent sur la seconde image.

Les inventaires forestiers semi-automatiques ne seront parfaitement acceptables que s'ils s'accompagnent d'un mécanisme d'évaluation convenable du cubage des arbres ou des peuplements. Bien sûr, l'actuel système de stratification régionale et d'évaluation du cubage d'après des parcelles représentatives de strates arborescentes pourrait être utilisé sans modification. La composition en espèces plus précise fournie par l'analyse « à l'arbre près » devrait déjà permettre de meilleures évaluations du cubage. De plus, alors que les systèmes lidars (Light Detection and Ranging [détection et télémétrie par la lumière]) aéroportés sont de plus en plus acceptés par la communauté de la foresterie, la hauteur des arbres pourrait être mesurée à distance et de nouvelles méthodes pourraient être mises au point. Dans le contexte des inventaires forestiers, le lidar pourrait s'avérer utile à trois niveaux : *a*) pour produire des modèles numériques de terrain détaillés, principalement utiles dans le cas d'applications en génie forestier, mais aussi nécessaires dans le cas des deux applications suivantes; *b*) pour faire l'échantillonnage des peuplements et obtenir l'estimation de la hauteur des arbres dominants et *c*), en mode haute résolution spatiale, pour obtenir la hauteur d'arbres individuels, en améliorer la délinéation et même délinéer leur cime. Pour le moment, l'application *a*) est la mieux documentée. L'application *b*) a également fait l'objet de recherches importantes, par exemple par Magnussen et coll. (1999). Nous aborderons brièvement l'application *c*).

Une synergie intéressante peut être obtenue à l'utilisation de données multispectrales à haute résolution et de données LiDAR de résolution comparable lorsqu'elles sont géoréférencées les unes par rapport aux autres. Comme on l'a mentionné dans la section concernant le prétraitement, les données LiDAR peuvent être utiles pour séparer les forêts mûres des étendues en voie de régénération, pour lesquelles des techniques d'analyse d'image différentes sont souvent nécessaires, ou pour aider à l'analyse des peuplements mûrs, quoique davantage clairsemés, dans lesquels le sous-étage ou des matériaux au sol sont éclairés et donc visibles. Les données LiDAR peuvent également être utilisées de manière synergique pour améliorer la délinéation des cimes des arbres (Gougeon et coll., 2001b). En effet, l'absence d'ombre entre les arbres peut nuire à la délinéation d'après la lumière visible lorsque des rangées d'arbres sont perpendiculaires à l'éclairement du soleil. N'étant pas influencé par ce phénomène, un modèle de la hauteur du couvert généré au moyen du LiDAR, peut permettre une délinéation convenable des cimes et empêcher la formation de nombreux groupes d'arbres. Dans le cas d'une cime bien délinéée, un opérateur de détection de maximums locaux devrait permettre d'en déterminer la plus grande hauteur. Cependant, puisque rien n'assure que ce sont bien les faîtes des arbres qui sont repérées, il peut s'avérer nécessaire de déduire la hauteur réelle des arbres. Des équations mettant en relation les hauteurs, les diamètres des cimes, les espèces et les densités peuvent être utilisées pour déduire le cubage d'arbres individuels (Larocque et Marshall, 1994). Des modèles de croissance et des projections du cubage dans le temps pourraient en outre être faits sur la base de l'analyse « à l'arbre près ».

Même si une approche « à l'arbre près » aux inventaires forestiers peut souvent fournir une composition en espèces améliorée et, ainsi, très probablement donner de meilleures évaluations du cubage et des possibilités de coupe, et même si elle peut être appliquée de manière très efficace et rentable, les inventaires basés sur l'analyse des cimes ne seront sans doute acceptés que très progressivement. De plus, plusieurs problèmes restent encore à étudier de manière plus approfondie. Pour le moment, l'approche « à l'arbre près » sera probablement davantage acceptée dans de nouveaux créneaux ou des créneaux relativement peu explorés, surtout si elle permet de résoudre des problèmes que les inventaires forestiers actuels ne permettent pas de traiter convenablement, comme par exemple:

- inventaires spécialisés ciblant uniquement la répartition spatiale de quelques espèces de très grande valeur;
- inventaires des trouées dans la forêt et des chicots à des fins d'aménagement de la faune;
- cartographie détaillée de zones riveraines;
- inventaires ou évaluations de coupes partielles ou sélectives.

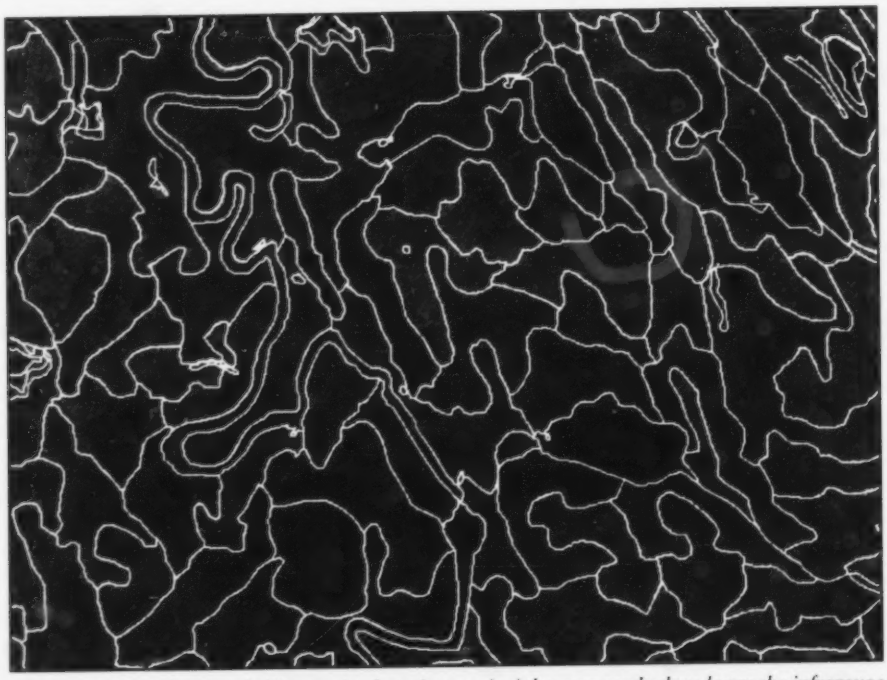


Figure 12 – *Polygones de peuplements de l'inventaire forestier provincial sur un rendu dans le proche infrarouge d'une partie d'une image IKONOS (4 m/pixel) de la région du lac à l'Ours, au Québec (note : les images IKONOS panchromatique et multispectrale pan-accentuée sont d'une résolution de 1 m/pixel, ce qui rend possible l'analyse « à l'arbre près »).*

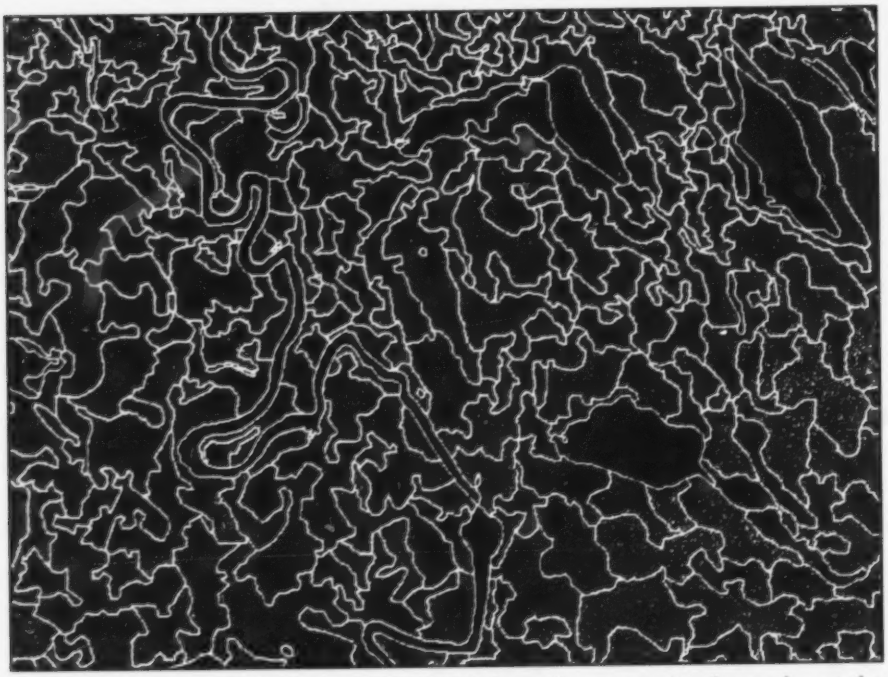


Figure 13 – *Analyse « à l'arbre près » de la région représentée à la figure 12, avec cette fois des peuplements forestiers générés par ordinateur d'après la composition en espèces, la densité et la fermeture du couvert des cimes individuelles. Les classes sont les suivantes : pin blanc (rouge), sapin-épinette (brun), cèdre (orange), érable (bleu pâle), peuplier (bleu), bouleau à papier (gris), bouleau jaune (jaune), feuillus tolérants (vert foncé), régénération (vert pâle) et étendues non végétalisées (blanc).*

Tel que mentionné précédemment, il n'est probablement pas nécessaire pour plusieurs de ces inventaires spécialisés d'être réellement à l'arbre près, car ils peuvent produire de bons résultats en ne faisant que s'inspirer de cette approche, tout en utilisant des groupes d'arbres plutôt que des cimes individuelles. Cela signifie que l'approche « à l'arbre près » peut être appliquée avec succès à des données de résolution spatiale plus sommaires (comme 1 m/pixel), ce qui se traduit par des coûts d'acquisition de données moins élevés et des contraintes de traitement informatisé moins exigeantes. Certaines analyses « à l'arbre près » pourraient même être effectuées à partir de photographies aériennes panchromatiques numérisées.

Par exemple, un projet pilote ciblant le pin blanc et le bouleau jaune dans la région de l'Outaouais – située dans la province de Québec, au Canada – et fait à partir d'une image IKONOS a été couronné de succès (Gougeon et coll., 2001a; CLC-Camint, 2001). Un des principaux objectifs de ce projet visait la détection de la seule présence de ces deux espèces dans des étendues où les inventaires forestiers classiques ne les mentionnaient même pas (dans la plupart des inventaires classiques, les espèces minoritaires qui représentent disons moins de 10 % de la fermeture du couvert à l'intérieur d'un peuplement sont habituellement ignorées). Ces espèces minoritaires peuvent néanmoins être de grande valeur ou, de grande valeur pour des sociétés forestières particulières qui en font leur spécialité.

Il existe de nombreuses autres applications forestières qui pourraient tirer avantage de l'approche « à l'arbre près ». Plusieurs des applications ayant fait l'objet de recherches sont énumérées au tableau 2, où l'on trouve également les références aux publications scientifiques pertinentes. Bien que certains des résultats obtenus soient extrêmement prometteurs, il faut garder à l'esprit qu'il s'agit d'un domaine nouveau, en émergence, et que, bien qu'un grand nombre de techniques et de technologies soient déjà disponibles, il reste encore des sujets à étudier et des problèmes pratiques à résoudre. De nombreux facteurs n'ont pas encore été pris en considération : la topographie, les variations saisonnières, les conditions atmosphériques, etc. Les techniques doivent être améliorées et éprouvées dans ces diverses conditions. Plus important encore, la précision et l'exactitude des résultats doivent être évaluées en fonction du type d'image utilisé (photographies aériennes en noir et blanc ou en couleurs numérisées ou encore images aériennes ou satellitaires provenant de divers capteurs) et de leurs résolutions spatiale, spectrale et radiométrique. Des données quantitatives simples comme la densité, la fermeture du couvert et le diamètre des cimes restent à valider, surtout en ce qui concerne les diverses résolutions spatiales (10-100 cm/pixel) et les divers types d'images.

Tableau 2 – *Autres applications forestières étudiées au moyen de l'analyse d'image « à l'arbre près » et références bibliographiques correspondantes*

Application en foresterie	**Référence**
Reconnaissance automatique et visuelle de cimes	Leckie et Gougeon, 1999
Signatures et classification d'espèces « à l'arbre près »	Gougeon, 1995a
Regroupement des cimes individuelles	Gougeon et coll., 1999
Évaluation de dommages	Leckie et coll., 1999a, 2001
Synergie avec des données lidars à haute résolution	Gougeon et coll., 2001b
Synergie avec des données lidars à faible résolution	Magnussen et coll., 1999
Inventaires spécialisés d'espèces minoritaires	Gougeon et coll., 2001a
Évaluations de la régénération	Gougeon et Leckie, 1999
Aide à l'interprétation	Leckie et coll., 1999b
Évaluation de forêts anciennes	Leckie et coll., 2002b
Effets de la résolution spatiale	Leckie et Gougeon, 1999
Analyse des trouées forestières	Leckie et coll., 1999c
Évaluation des zones riveraines	Paradine et coll., 1999

Conclusion

Nous avons présenté quelques-unes des techniques, des méthodes et des outils d'analyse d'image disponibles pour extraire de l'information basée sur l'analyse des cimes d'arbres à partir d'images à haute résolution spatiale et exposé le lecteur aux possibilités qu'offre l'approche « à l'arbre près » pour l'inventaire forestier. Nous croyons que des inventaires forestiers basés sur l'analyse des cimes seraient plus précis, plus exacts et plus opportuns que les inventaires classiques. En outre, un niveau de détail sans précédent permettrait l'extraction de toute une gamme de renseignements supplémentaires utiles à l'aménagement intégré de la forêt comme la position des chicots, les dimensions et la répartition des trouées, la position des arbres de grande valeur ou la cartographie des zones riveraines.

Jusqu'à très récemment, de telles analyses « à l'arbre près » n'étaient possibles qu'avec des images provenant de capteurs aéroportés. Leurs plateformes instables, les étroits couloirs explorés et les grands angles de champ exigeaient des efforts substantiels de prétraitement pour compenser l'instabilité des aéronefs, normaliser les images et créer des mosaïques permettant de couvrir de grandes étendues. La disponibilité récente de satellites à haute résolution spatiale (et de modèles améliorés éventuels), la stabilité de leur plateforme, leur angle de champ étroit et la couverture planétaire qu'ils offrent, permettent la saisie d'images de très bonne qualité et d'une grandeur commensurable avec celle des cartes forestières, ce qui pourraient rendre les inventaires « à l'arbre près » très efficaces.

Bibliographie

Andrew, R.M.; Trotter, C.M.; Höck, B.K.; Dunningham, A. 1999. Inventory of plantation forests using crown delineation techniques. Pages 131-138 *in* Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21^{e} Symposium canadien de télédétection, Vol. II. Ottawa, Canada, 21-24 juin 1999. ERIM International Inc., Ann Arbor, MI.

Bhogal, A.S.; Goodenough, D.G.; Gougeon, F.; Dyk, A.; Nieman, O. 2000. AVIRIS imagery for forest attribute information: anisotropic effects and limitations in multitemporal data. Pages 1388-1392 (Vol. 4) *in* Proc. 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'00), Hawaii, 24-28 juillet 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineer, Inc, Piscataway, New Jersey.

Brandtberg, T. 1999. Automatic individual tree-based analysis of high spatial resolution remotely sensed data. Doctoral dissertation. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae – Silvestria 118. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Suède. ISBN 91-576-5852-8.

CLC-Camint. 2001. Application d'une méthode d'identification géospatiale du pin blanc à partir d'images satellitaires à haute résolution IKONOS. Rapport final - Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier – Volet 1. CLC-Camint, Hull (Québec), avril 2001. 34 p.

CLC-Camint. 2002. Vers une meilleure connaissance forestière grâce aux images satellitaires à haute résolution IKONOS – Phase II. Rapport final - Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier – Volet I. CLC-Camint, Hull (Québec), avril 2002. 88 p.

Culvenor, D.S. 2000. Development of a tree delineation algorithm for application to high spatial resolution digital imagery of Australian native forest. Ph.D. Thesis, University of Melbourne, Australia.

Definiens Inc. 2000. eCognition object oriented image analysis user guide. Definiens Inc., Munich, Allemagne.

Dralle, K.; Rudemo, M. 1996. Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos. Canadian Journal of Forest Research 26:1228-1236.

Eldridge, N.R.; Edwards, G. 1993. Acquiring localized forest inventory information: extraction from high resolution airborne digital images. Pages 443-448 *in* P. Gagnon and N. O'Neil, eds. Proceedings of the 16th Canadian Symposium on Remote Sensing/8^{e} Congrès de l'Association québécoise de télédétection. Sherbrooke (Québec), Canada, 7-10 juin 1993. Association québécoise de télédétection, Sainte-Foy (Québec).

Gougeon, F.A.; Wong, A.K.C. 1986. Spectral and textural segmentation of multispectral aerial images. Pages 291-300 *in* D. Thomson and R.J. Brown, eds. Proceedings of the 10th Canadian Symposium on Remote Sensing. Edmonton (Alberta), Canada, 5-8 mai 1986. Institut aéronautique et spatial du Canada, Ottawa (Ontario).

Gougeon, F.A.; Moore, T. 1989. Classification individuelle des arbres à partir d'images à haute résolution spatiale. Pages 185 à 196 *dans* M. Bernier, F. Bonn, et P. Gagnon, éd. Télédétection et gestion des ressources - Vol. VI - 6^{e} Congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke (Québec), Canada, 4-6 mai 1988. Association québécoise de télédétection, Sainte-Foy (Québec).

Gougeon, F.A. 1995a. Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS Images. Journal canadien de télédétection 21(1):1-9.

Gougeon, F.A. 1995b. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. Journal canadien de télédétection 21(3):274-284.

Gougeon, F.A. 1997. A locally adaptive technique for forest regeneration assessments from high resolution aerial images. *In* Proceedings of the 19th Canadian Symposium on Remote Sensing (CDROM). Ottawa (Ontario), Canada, 24-30 mai 1997. Institut aéronautique et spatial du Canada, Ottawa. 9 p.

Gougeon, F.A. 1999. Automatic individual tree crown delineation using a valley-following algorithm and rule-based system. Pages 11-23 *in* D.A. Hill and D.G. Leckie, eds. International Forum - Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 10-12 février 1998. Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 10-12 février 1998. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.).

Gougeon, F.A.; Leckie, D.G.; Scott, I.; Paradine, D. 1999. Individual tree crown species recognition: the Nahmint study. Pages 209-223 *in* D.A. Hill and D.G. Leckie, eds. International Forum - Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 10-12 février 1998. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.).

Gougeon, F.A.; Leckie, D.G. 1999. Forest regeneration: individual tree crown detection techniques for density and stocking assessment. Pages 169-177 *in* D.A. Hill and D.G. Leckie, eds. International Forum - Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 10-12 février 1998. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.).

Gougeon, F.A.; Labrecque, P.; Guérin, M.; Leckie, D.G.; Dawson, A. 2001a. Détection du pin blanc dans l'Outaouais à partir d'images satellitaires à haute résolution IKONOS. *Dans* Actes du 23e Symposium canadien de télédétection/ 10e Congrès de l'Association québécoise de télédétection (CDROM), Sainte-Foy (Québec), Canada, 21-24 août 2001. Institut aéronautique et spatial du Canada, Ottawa.

Gougeon, F.A.; St-Onge, B.A.; Wulder, M.; Leckie, D.G. 2001b. Synergy of airborne laser altimetry and digital videography for individual tree crown delineation. *In* Proc. 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing/10e Congrès de l'Association québécoise de télédétection (CDROM), Sainte-Foy (Québec), Canada, 21-24 août 2001. Institut aéronautique et spatial du Canada, Ottawa.

Gougeon, F.A.; Leckie, D.G. 2001. Individual tree crown image analysis: a step towards precision forestry. *In* Proceedings of the First International Precision Forestry Symposium (CDROM). Seattle, Washington, USA, 17-20 juin 2001. University of Washington, Seattle.

Larocque, G.R.; Marshall, P.L. 1994. Crown development in red pine stands. I. Absolute and relative growth measures. Revue canadienne de recherche forestière 24(4):762-774.

Larsen, M.; Rudemo, M. 1998. Optimizing templates for finding trees in aerial photographs. Pattern Recognition Letters 19(12):1153-1162.

Leckie, D.G.; Gillis, M.D. 1995. Forest inventory in Canada with emphasis on map production. Forestry Chronicle 71(1): 74-88.

Leckie, D.G.; Gougeon, F.A. 1999. An assessment of both visual and automated tree counting and species identification with high spatial resolution multispectral imagery. Pages 141-152 *in* D.A. Hill and D.G. Leckie, eds. International Forum - Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 10-12 février 1998. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.).

Leckie, D.G.; Jay, C.; Paradine, D.; Sturrock, R. 1999a. Preliminary assessment of *Phellinus weirii*-infected (laminated root rot) trees with high resolution CASI imagery. Pages 187-195 *in* D.A. Hill and D.G. Leckie, eds. International Forum - Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 10-12 février 1998. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.).

Leckie, D.G.; Gillis, M.D.; Gougeon, F.A.; Lodin, M.; Wakelin, J.; Yuan, X.P. 1999b. Computer-assisted photointerpretation aids to forest inventory mapping: some possible approaches. Pages 335-343 *in* D.A. Hill et D.G. Leckie, eds. International Forum - Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 10-12 février 1998. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.).

Leckie, D.G.; Burnett, C.; Nelson, T.; Jay, C.; Walsworth, N.; Gougeon F.A.; Cloney, E. 1999c. Forest parameter extraction through computer-based analysis of high resolution imagery. Pages 205-213 *in* Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21e Symposium canadien de télédétection, Vol. II. Ottawa, Canada, 21-24 juin 1999. ERIM International Inc., Ann Arbor, MI.

Leckie, D.G.; Jay, C.; Hill, D.; Shand, A.; Gougeon, F.A.; Beaubien, J.; Alfaro, R. 2001. Remote Sensing of Eastern Spruce Budworm in the Fort Nelson Region. Report to the British Columbia Ministry of Forests (Contract no. FR01RPG-024). Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (Colombie-Britannique), mai 2001, 20 p.

Leckie, D.G.; Gougeon, F.A.; Hill, D.; Jordan, R.; Morrison, A. 2002a. Automated stand delineation for forest inventory mapping in British Columbia: with IKONOS imagery and digital orthophoto mosaics. Final report to the British Columbia Ministry of Forests and Ministry of Sustainable Resource Management. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (Colombie-Britannique), juin 2002, 22 p.

Leckie, D.G.; Gougeon, F.A.; Tinis, S.; Nelson, T.; Burnett, C.; Paradine, D. 2002b. Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. Manuscript in preparation for IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing.

Magnussen, S.; Gougeon, F.A.; Leckie, D.; Wulder, M. 1999. Predicting tree heights from a combination of LIDAR canopy heights and digital stem counts. Pages 498-513 *in* Proceedings of a IUFRO Conference on Remote Sensing and Monitoring, 1-3 juin 1999. Rogow, Pologne. European Commission Joint Research Centre, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community.

Paradine, D.; Leckie, D.; Jay, D. 1999. Automated stream planform mapping: a test study. Pages 387-394 *in* D.A. Hill and D.G. Leckie, eds. International Forum - Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 10-12 février 1998. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.).

Pinz, A.J. 1991. A computer vision system for the recognition of trees in aerial photographs. Pages 111-124 *in* T. Tilton, ed. Multisource Data Integration in Remote Sensing. Proceedings of a workshop held at the University of Maryland, College Park, Maryland, 14-15 June 1990. NASA Conf. Pub. 3099.

Pinz, A.; Zaremba, M.B.; Bischof, H.; Gougeon, F.A.; Locas, M. 1993. Neuromorphic methods for recognition of compact image objects. Machine Graphics and Vision 2(3):209-229.

Pollock, R.J. 1994. A model-based approach to automatically locating individual tree crowns in high-resolution images of forest canopies. First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11-15 septembre 1994. Environmental Research Institute of Michigan (ERIM), Ann Arbor, MI.

Pouliot, D.A.; King, D.J.; Bell, F.W.; Pitt, D.G. 2002. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. Remote Sensing of Environment 82: 322-334.

St-Onge, B. 2001. Estimating merchant wood volume of aspen and spruce stands of the boreal forest using airborne scanning laser altimetry. *In* Proc. 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing/10e Congrès de l'Association québécoise de télédétection (CDROM), Sainte-Foy (Québec), Canada, 21-24 août 2001. Institut aéronautique et spatial du Canada, Ottawa.

Uuttera, J.; Haara, A.; Tokola, T.; Maltamo, M. 1998. Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs. Forest Ecology and Management 110: 275-282.

Wulder, M.; Niemann, K.O.; Goodenough, D.G. 2000. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. Remote Sensing of Environment 73:103-114.

Ressources du Service canadien des forêts

Pour de plus amples renseignements au sujet du Service canadien des forêts, visiter notre site Web à : www.nrcan.gc.ca/cfs-scf ou prendre contact avec un des centres suivants du Service canadien des forêts :

1 Centre de foresterie de l'Atlantique
C.P. 4000
Fredericton (Nouveau-Brunswick) E3B 5P7
Tél. : (506) 452-3500 Téléc. : (506) 452-3525
http://atl.cfs.nrcan.gc.ca/

Centre de foresterie de l'Atlantique - Bureau de district
Centre de foresterie du campus Sir Wilfred Grenfell
University Drive
Corner Brook (Terre-Neuve) A2H 6P9
Tél. : (709) 637-4900 Téléc. : (709) 637-4910

2 Centre de foresterie des Laurentides
1055, rue du P.E.P.S., C.P. 3800
Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7
Tél. : (418) 648-5788 Téléc. : (418) 648-5849
http://www.cfl.scf.rncan.gc.ca/

3 Centre de foresterie des Grands Lacs
C.P. 490, 1219 Queen Street East
Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 5M7
Tél. : (705) 949-9461 Téléc. : (705) 759-5700
http://www.glfc.cfs.nrcan.gc.ca/

4 Centre de foresterie du Nord
5320–122nd Street
Edmonton (Alberta) T6H 3S5
Tél. : (403) 435-7210 Téléc. : (403) 435-7359
http://nofc.cfs.nrcan.gc.ca/

5 Centre de foresterie du Pacifique
506 West Burnside Road
Victoria (Colombie-Britannique) V8Z 1M5
Tél. : (250) 363-0600 Téléc. : (250) 363-0775
http://pfc.cfs.nrcan.gc.ca/

6 Administration centrale
580, rue Booth, 8e étage
Ottawa (Ontario) K1A 0E4
Tél. : (613) 947-7341 Téléc. : (613) 947-7396
http://www.nrcan.gc.ca/cfs/

Pour commander des publications en ligne, visiter la librairie du Service canadien des forêts à : librairie.scf.rncan.gc.ca